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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НОСОВ Павло Сергійович

УДК 656.6.052:656.6.08

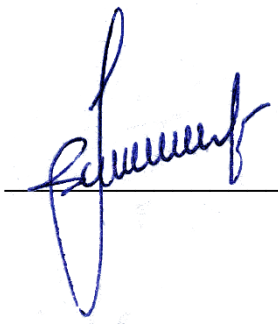
ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ЕРГАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідні джерела. Усі частини тексту дисертації, під час написання яких використовувалися технології штучного інтелекту, перевірені та відредаговані мною особисто



_____П. С. Носов

Одеса – 2026

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. Підготовлена в Херсонській державній морській академії та Одеському національному морському університеті, подана до захисту в Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, 2026 рік.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення безпеки мореплавства шляхом розроблення науково-методологічних основ управління ергатичними системами навігаційного забезпечення. Запропонований підхід ґрунтується на системному врахуванні людського фактора, інтелектуальній обробці навігаційної інформації, оцінюванні ризиків та адаптивній підтримці прийняття рішень у процесах управління рухом судна, що забезпечує перехід від техноцентричного вдосконалення окремих засобів навігації до комплексного управління взаємодією оператора, інформаційного середовища, ризику та режимів керування рухом судна в єдиній ергатичній системі.

Необхідність вирішення зазначеної науково-технічної проблеми зумовлена наявністю в сучасному судноводінні та системах навігаційного забезпечення низки невирішених або частково вирішених науково-практичних завдань, серед яких:

– підвищення безпеки, стійкості та ефективності функціонування систем навігаційного забезпечення в умовах зростання інформаційного навантаження на оператора, ускладнення навігаційної обстановки, дефіциту часу на прийняття рішень та розширення застосування автоматизованих й інтелектуальних засобів керування;

– перехід від фрагментарного вдосконалення окремих технічних засобів навігації до комплексного управління ергатичною системою, у якій оператор, навігаційна інформація, ризики, режими керування та результати руху судна утворюють взаємопов’язаний функціональний контур.

У результаті проведеного аналізу наукової проблеми сформульовано *гіпотезу* про те, що підвищення адаптивності, достовірності, стійкості та ефективності управління ергатичними системами навігаційного забезпечення може бути досягнуте шляхом інтеграції параметрів людського фактора до моделей, методів і засобів навігаційного забезпечення, інтелектуальної обробки навігаційної інформації, оцінювання ризиків у процесі управління рухом судна.

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.

Головними завданнями дослідження є:

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.

За підсумками аналізу предметної галузі встановлено, що вирішення зазначеної проблеми потребує 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, і недостатньою формалізацією когнітивних, часово-поведінкових і психофізіологічних характеристик оператора в наявних моделях управління рухом судна, з іншого боку. У більшості сучасних підходів людський фактор розглядається переважно як зовнішнє джерело помилок або як 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 та 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 рухом встановлено, що подальше підвищення безпеки мореплавства потребує переходу від техноцентричного вдосконалення окремих засобів навігації до управління інформаційною системою навігаційного забезпечення (ІСНЗ) 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 управління 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-72, SOLAS, STCW-78, Bridge SOP, портові процедури, діяльність оператора, режими керування та результати реалізації режимів безпечного керування. Це дає змогу подати процес управління рухом судна як взаємодію інформації, рішення, ризику та режиму керування в єдиній функціональній структурі.

Розроблено аналого-індикаторну модель стійкості та керованої динаміки ергатичної системи навігаційного забезпечення на основі гравітаційно-інерціальної інтерпретації. Запропонована модель дає змогу 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 ІСНЗ.

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 мікроваріативності, їх фрактальне кодування, оцінювання епізодного ризику та робастний контроль якості. Це забезпечує формування відтворюваних профілів маневрування і кількісне оцінювання траєкторної мікроваріативності як індикатора впливу людського фактора на безпеку руху судна.

Набули подальшого розвитку 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 та змін параметрів маневрування.

Розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги оператора, яка дає змогу описувати обмежений ресурс уваги як метричний 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 управління рухом судна.

Розроблено моделі ідентифікації дисторсії суб’єктивного часу, когнітивних, часово-поведінкових і психофізіологічних станів оператора. Запропоновані моделі дають змогу 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, рівень ризику, правило реагування та форма коригування, підтримки або тренінгового впливу. На цій основі обґрунтовано інтегровану схему: дані про середовище та оператора – ознаки

стану і поведінки – ідентифікація рівня ризику – правило реагування – коригувальне втручання або рекомендація.

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; інтегральний показник $I_{HF\to R}$ верифіковано 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 сягає 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 їх придатність до використання в системах навігаційного забезпечення, підтримки прийняття рішень, автоматизованого керування рухом, експертного аналізу траєкторій, оцінювання ризиків людського фактора та професійної підготовки морських фахівців.

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 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 та 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.

ABSTRACT

Nosov P.S. Scientific and Methodological Foundations for the Control of Ergatic Systems of Navigational Support. – A qualifying scientific work in the form of a manuscript. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.13 – Navigation and Traffic Control. Prepared at Kherson State Maritime Academy and Odesa National Maritime University; submitted for defense at the National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, 2026.

The dissertation addresses a relevant scientific and technical problem of enhancing maritime safety through the development of scientific and methodological foundations for the management of ergatic navigational support systems. The proposed approach is based on the systematic consideration of the human factor, intelligent processing of navigational information, risk assessment, and adaptive decision support in ship motion control processes. This approach enables a transition from the technocentric improvement of individual navigation aids to the integrated management of the interaction among the operator, the

information environment, risk factors, and ship motion control modes within a unified ergatic system.

The need to address the specified scientific and technical problem is determined by the existence of a number of unresolved or only partially resolved scientific and practical issues in modern ship navigation and navigational support systems, including:

- enhancing the safety, stability, and efficiency of navigational support systems under conditions of increasing information load on the operator, growing complexity of the navigational environment, limited time for decision-making, and the expanding use of automated and intelligent control systems;
- transitioning from the fragmented improvement of individual technical navigation aids to the integrated management of an ergatic system in which the operator, navigational information, risks, control modes, and vessel motion outcomes form an interconnected functional loop.

As a result of the analysis of the scientific problem, the following hypothesis was formulated: improving the adaptability, reliability, stability, and efficiency of the control of ergatic systems of navigational support can be achieved by integrating human-factor parameters into models, methods, and tools of navigational support, intelligent processing of navigational information, and risk assessment in ship-motion control.

The purpose of the research is to improve maritime navigation safety through the development of scientific and methodological foundations, models, methods, and tools for the assessment and control of human-factor risks in ergatic systems of navigational support based on the formalization of operator states, intelligent processing of AIS/ECDIS data, and adaptive decision support in ship-motion control processes.

The main objectives of the research are:

1. To determine the methodological foundations and principles for developing conceptual models for the control of ergatic systems of navigational support, within which the operator, information field, technical means, external navigational

environment, and control modes are considered interrelated elements of a unified functional loop;

2. To develop an intelligent technology for navigational information processing and prediction of operator actions based on fractal, episodic, and risk-oriented analysis of AIS/ECDIS trajectories;

3. To investigate, develop, and formalize models for identifying the cognitive, temporal, psychophysiological, and behavioral states of the operator in ship-motion control processes;

4. To develop models, methods, and procedures for the assessment and control of human-factor risks in ergatic systems of navigational support;

5. To perform integral experimental verification of the developed models, methods, and mechanisms for controlling ergatic systems of navigational support using AIS/ECDIS data, simulator scenarios, LOG files, and operator- and trajectory-based indicators.

The object of the research is ergatic processes of navigational support and ship-motion control under the influence of the human factor.

The subject of the research is models, methods, and mechanisms for formalizing operator states and reliability, intelligent processing of trajectory data, and adaptive decision support within the control structure of ergatic navigational systems for ship motion control.

Based on the analysis of the subject area, the solution to the stated problem lies in the need to improve the safety, stability, and efficiency of ship-motion control under conditions of intensified shipping operations, increasing information load on the operator, a more complex navigational environment, and the widespread use of automated navigational support tools.

A systemic contradiction was identified between the need to improve the reliability, responsiveness, and adaptability of navigational support processes, on the one hand, and the insufficient formalization of the operator’s cognitive, temporal-behavioral, and psychophysiological characteristics in existing ship-motion control models, on the other hand. In most contemporary approaches, the human factor is considered primarily as an external source of errors or as an operational limitation,

whereas under real ship-motion control conditions it represents an internal parameter of the ergatic system that affects the perception of the navigational situation, the timeliness of responses, the selection of control actions, and the level of risk.

Based on the analysis of marine casualties, the development of the e-Navigation concept, contemporary AIS/ECDIS, RADAR/ARPA, VTS, GNSS, decision support systems, and automated ship-motion control tools, it was established that further improvement of maritime navigation safety requires a transition from technocentric improvement of individual navigational means to the control of an information system of navigational support (ISNS) as an integrated ergatic scheme: “operator – information – risk – decision – control mode.”

It was demonstrated that the effectiveness of ergatic systems of navigational support is determined not only by the quality of technical means or automation algorithms but also by the consistency of the operator’s information field, functional state, navigational environment parameters, regulatory constraints, human-factor risks, and ship-motion control modes.

A comprehensive approach to the control of ergatic systems of navigational support was proposed, based on the combination of intelligent AIS/ECDIS data processing methods, fractal-episodic trajectory analysis, formalization of cognitive and temporal-behavioral operator states, human-factor risk assessment, expert LOG validation, and adaptive decision support in ship-motion control processes.

A conceptual and structural model of the operator’s information field in ergatic systems of navigational support was developed. The model combines the external navigational environment, technical information flows from ECDIS, AIS, RADAR/ARPA, GNSS, VTS, meteorological data, COLREG requirements, Bridge SOPs, port and company procedures, operator activity, control modes, and safety-related outcomes. This makes it possible to represent the ship-motion control process as the interaction of information, decision, risk, and control mode within a unified functional structure.

An indicator model of stability and controlled dynamics of an ergatic system of navigational support based on a gravitational-inertial interpretation was developed. The proposed model makes it possible to formalize the stability margin,

functional reserve, the influence of external and internal disturbances, conditions for transition to a stressed or critical mode, and the role of the human factor in changing the controllability limits of the ISNS.

A formalized fractal-episodic method for intelligent processing of AIS/ECDIS trajectories was developed to identify ship micro-movements, local deviations, minor course corrections, and trajectory indicators of the operator's control activity. The method combines metric normalization of navigational data, calculation of kinematic features, fractal assessment in sliding windows, identification of microvariability episodes, their fractal coding, episodic risk assessment, and robust quality control. This provides reproducible maneuvering profiles and quantitative assessment of trajectory microvariability as an indicator of the human-factor influence on ship-motion safety.

The conceptual foundations for constructing an intelligent technology for navigational information processing were further developed, according to which AIS/ECDIS data are transformed into a formalized feature space of operator behavior suitable for the analysis of minor course corrections, local deviations from the track line, and changes in maneuvering parameters.

A formal-geometric model of the operator's attention distribution was developed, which makes it possible to describe the limited attention resource as a metric space of its allocation 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 ship-motion control scheme.

Models for identifying subjective time distortion and the operator's cognitive, temporal-behavioral, and psychophysiological states were 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 diagnosis, prediction, and decision support.

The models and methods for managing human-factor risks in ergatic systems of navigational support were further developed. Within the proposed approach, risk is regarded as a controllable object for which indicators of an operator's hazardous state, risk level, response rule, and the form of corrective, supportive, or training influence are determined. On this basis, an integrated scheme was substantiated: environmental and operator data – state and behavioral indicators – identification of the risk level – response rule – corrective intervention or recommendation.

Experimental verification of the proposed models and methods was performed using AIS/ECDIS data, simulator scenarios, LOG files, and operator- and trajectory-based indicators. Fractal-episodic analysis was tested on a dataset of 8,684 AIS/ECDIS passages; operator-temporal identification was tested using data from 76 operators; and the integral IHF→R indicator was tested in six ISNS operating scenarios. The scenario-modeling results established that the mean value of the integral indicator of the human-factor influence on ISNS risk increases from 0.40426 for the open-sea scenario to 0.949974 for the storm emergency mode in a narrow channel, while the probability of a critical mode equals 1 in limited-visibility and storm emergency-passage scenarios.

Final expert LOG validation of the developed models and methods was carried out. From more than 300 simulator trajectories, 78 LOG passages with human-factor manifestations were selected. The experimental verification performed confirmed the correctness of the proposed scientific and methodological provisions and their suitability for use in navigational support systems, decision support systems, automated ship-motion control, expert trajectory analysis, human-factor risk assessment, 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, diagnosis of operator states, and human-factor risk assessment. The obtained results may be used to create intelligent ergatic systems of navigational support, decision support systems, expert trajectory-control tools, adaptive risk-management tools, and to improve 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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THESIS TOPIC

В опублікованих у співавторстві наукових працях особисто авторові 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., Matejchuk, 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 позаштатної 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 Moution 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 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.**, Cherniavskyi, 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., Cherniavskyi, 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., Cherniavskyi, 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.**, Cherniavskyi, 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 мікроваріативності 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 позаштатних ситуацій при управлінні судном // Науковий вісник Херсонської

державної морської академії. 2017. № 2 (17). С. 238–243. – *Формалізовано позаштатну 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 мікроваріативності 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. P. 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. P. 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. P. 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. P. 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". P. 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. *Проєктний 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. P. 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. P. 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.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ……... 33

ВСТУП …… 35

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ Й УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА…… 45

1.1. Методологічні основи формування концептуальних моделей і методів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення…… 45

1.2. Концептуальні моделі інтелектуальної технології обробки навігаційної інформації та прогнозування дій оператора…… 56

1.3. Теоретичні засади ідентифікації когнітивних і психофізіологічних станів оператора в процесах управління рухом судна…….. 61

1.4. Моделі та методи управління ризиками прояву людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення…… 66

1.5. Експериментально-прикладні дослідження автоматизованих систем управління рухом судна та засобів навігаційного забезпечення ……..... 69

1.6. Інформаційно-технологічні засади діагностики та прогнозування кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора……. 74

1.7. Обґрунтування вибору наукового напряму дослідження…….. 80

1.8. Методи дослідження дисертаційної роботи…… 83

1.9. Методика проведення дисертаційного дослідження…….. 89

1.10. Висновки до Розділу 1……. 91

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ЕРГАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ…….. 92

2.1. Концептуально-структурна модель інформаційного поля оператора в ергатичних системах навігаційного забезпечення і управління рухом суден ……. 92

2.2. Аналого-індикаторна модель стійкості та керованої динаміки ергатичних систем навігаційного забезпечення на основі гравітаційно-інерціальної інтерпретації…….. 99

2.3. Загальна схема формалізації та уніфікації навігаційних даних ІСНЗ для аналізу траєкторних ознак дій оператора…… 123

2.4. Методологічні принципи інтеграції когнітивних та психофізіологічних станів оператора в контур управління ергатичною системою ……. 132

2.5. Висновки до Розділу 2……. 143

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФРАКТАЛЬНО-ЕПІЗОДНОГО АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБРОБКИ ІСНЗ-ТРАЄКТОРІЙ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ІНДИКАТОРІВ МІКРОВАРІАТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ СУДНОМ……..... 145

3.1 Теоретичні засади фрактального аналізу ІСНЗ-траєкторій для виявлення мікрорухів судна та траєкторних індикаторів керування в ергатичних системах судноводіння……... 145

3.2. Формування системи фрактальних та динамічних показників у ковзних вікнах……...…….. 163

3.3. Метод виявлення та агрегації епізодів мікрорухів за квантильними порогами фрактальних показників…… 173

3.4. Інтегральні показники рейсу та нормування за довжиною шляху….. 179

3.5. Методика фрактального кодування епізодів та оцінювання епізодної складності маневрування ……... 185

3.6. Фрактальне оцінювання індексу хаотичності–впевненості при керуванні судном за ІСНЗ-траєкторіями…..…… 205

3.7. Контроль якості ІСНЗ-треків для ризик-орієнтованої валідації…… 216

3.8. Формування протоколу ризик-орієнтованої статистичної валідації індексу хаотичності – впевненості за траєкторіями руху судна ……... 220
3.9. Робастний контроль та обмеження валідації фрактально-епізодного методу……. 223
3.10. Висновки до Розділу 3……. 226
РОЗДІЛ 4. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИХ СТАНІВ ОПЕРАТОРА В ЗАДАЧАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕРГАТИЧНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ…….. 229
4.1. Формально-геометрична модель розподілу уваги оператора та прогнозування часових станів під час несення навігаційної вахти…… 229
4.2. Моделі, методи та засоби ідентифікації дисторсії суб'єктивного часу оператора в процесах управління рухом судна…… 241
4.3. P-адична модель структурної ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора та адаптивного керування навігаційною безпекою ……..... 264
4.4. Логіко-геометричні моделі антиципації, мотиваційних екстремумів і поведінкових стратегій оператора у складних навігаційних ситуаціях 284
4.5. Метод непрямої ідентифікації функціонального виснаження оператора за траєкторіями дій та часовими параметрами взаємодії із засобами навігаційного забезпечення……... 293
4.6. Моделі ідентифікації критичних ситуацій та прогнозування дій оператора в ергатичних системах керування рухом судна ……. 309
4.7. Висновки до Розділу 4…… 325
РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА В ЕРГАТИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ……... 329
5.1. Модель *p*-адичної структуризації сприйняття навігаційних ситуацій та прогнозування реакцій оператора за часовими кодами дій…….. 329

5.2. Методи ранньої ідентифікації втрати керованості судна та автоматизованого аварійного розходження в зонах підвищеного навігаційного ризику…….. 342

5.3. Інформаційно-аналітичні моделі розподілу уваги, дисторсії суб'єктивного часу та антиципаційно-ентропійних станів оператора в процесах управління рухом судна…… 356

5.4. Методичні засади психодіагностичного оцінювання та тренінгового формування взаємодії «капітан–лоцман» в ергатичній системі навігаційного містка……..……..... 368

5.5. Висновки до Розділу 5……. 380

РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ…… 384

6.1. Експериментальна база верифікації моделей ергатичних систем навігаційного забезпечення……..…….. 384

6.2. Експериментальна верифікація фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій та геоінформаційне відображення результатів…. 389

6.3. Експертне оцінювання ECDIS-відхилень від експертно-заданого профілю руху судна…… 399

6.4. Експериментальна ідентифікація просторово-часових патернів уваги оператора та прогнозування переходів між просторами сприйняття в контурі ІСНЗ ……. 407

6.5. Експериментальна ідентифікація непрямих ознак функціонального стану оператора……. 427

6.6. Сценарно-імітаційне моделювання інтегрального показника впливу людського фактора на ризик функціонування ІСНЗ …… 440

6.7. Експертна система валідації LOG-проходів як завершальний контур експериментальної перевірки моделей ІСНЗ……... 451

6.8. Висновки до Розділу 6……. 463

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ……..……. 466

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 471

ДОДАТКИ……. 514

ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дослідження…… 515

ДОДАТОК Б. Реєстраційні картки НДР…….. 524

ДОДАТОК В. Довідка про керівництво науково-дослідною лабораторією…….. 534

ДОДАТОК Г. Патент на корисну модель України……. 535

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

AIS – автоматична ідентифікаційна система;

ARPA – автоматизована радіолокаційна прокладка;

COLREG-72 – Міжнародні правила запобігання зіткненню суден на морі 1972 року;

COG – курс над ґрунтом;

CRI – індекс ризику зіткнення;

DCPA – найменша дистанція зближення;

DFA – метод аналізу детрендованих флуктуацій;

DMS – формат подання координат «градуси–хвилини–секунди»;

DSS – система підтримки прийняття рішень;

ECDIS (ЕКНІС) – електронна картографічна навігаційно-інформаційна система;

FRAM – метод функціонального резонансного аналізу;

GNSS – глобальна навігаційна супутникова система;

GPS – глобальна система позиціонування;

HFACS – система аналізу та класифікації людського фактора;

HMI – людино-машинний інтерфейс;

IMO – Міжнародна морська організація;

ISM Code – Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден і запобігання забрудненню;

LSTM – мережа довгої короткочасної пам’яті;

MASS – автономні надводні морські судна;

MATLAB – програмне середовище математичного моделювання;

NTPRO 5000 – навігаційний тренажер Navi-Trainer Professional 5000;

RADAR/ARPA – радіолокаційна система / автоматизована радіолокаційна прокладка;

RMS – середньоквадратичне значення;

ROT – кутова швидкість повороту судна;

SAR – пошук і рятування;

SOLAS – Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі;

STCW-78 – Міжнародна конвенція про підготовку, дипломування моряків і несення вахти 1978 року;

TCPA – час до найменшої дистанції зближення;

VTS – служба управління рухом суден;

XTE – поперечне відхилення від траєкторії;

ДЧС – дисторсія часу оператора-судноводія;

ІСНЗ – інформаційна система навігаційного забезпечення;

МАІКС – модуль автоматизованої ідентифікації критичних ситуацій;

ММС – ментально-мотиваційний стан;

НІС – навігаційна інформаційна система;

РЛС – радіолокаційна система;

СППР – система підтримки прийняття рішень.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток морського транспорту характеризується зростанням інтенсивності руху, ускладненням навігаційних обставин та інформаційного навантаження на оператора, що актуалізує дослідження закономірностей процесів навігації й управління рухом суден, а також розвиток автоматизованих та інтелектуальних засобів їх керування. За цих умов безпека судноплавства визначається не лише технічним рівнем окремих навігаційних засобів, а насамперед узгодженістю функціонування ергатичної системи навігаційного забезпечення та управління рухом, у якій оператор, навігаційна інформація, засоби спостереження і підтримки прийняття рішень, режими керування та зовнішнє середовище утворюють єдиний інформаційно-керувальний контур.

Проблемам підвищення безпеки судноводіння, розвитку засобів навігаційного забезпечення, автоматизованих систем керування рухом суден, систем підтримки прийняття рішень, аналізу AIS/ECDIS-даних, а також урахування людського фактора, присвячено праці відомих вітчизняних і зарубіжних вчених: Бурмаки І.О., Вагущенка Л.Л., Онищенка О.А., Ворохобіна І.І., Мельника О.М., 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. Водночас більшість наявних підходів орієнтована переважно на окремі складові проблеми – технічні засоби навігації, автоматизоване керування рухом, обробку траєкторних даних, оцінювання ризиків або моделі поведінки оператора – без належного методологічного поєднання цих складових у межах єдиної ергатичної системи.

Недостатньо опрацьованими залишаються теоретико-методологічні засади управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у яких людський фактор розглядається не як зовнішнє джерело похибок або експлуатаційне обмеження, а як внутрішній функціональний компонент, що впливає на сприйняття навігаційної ситуації, вибір керувальних дій, стійкість режимів функціонування та рівень безпеки руху судна. Особливої ваги це

набуває в умовах інтелектуалізації судноводіння, коли AIS/ECDIS-дані, траєкторні характеристики, ознаки мікрокорекцій, поведінкові патерни та індикатори ризику мають перетворюватися на формалізований інформаційний простір діагностики, прогнозування і підтримки прийняття рішень зокрема для виявлення та попередження негативних проявів людського фактора оператора.

Отже, актуальність теми дисертації визначається необхідністю 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 таких систем може бути досягнуте шляхом формалізованого включення параметрів людського фактора до моделей інтелектуальної обробки навігаційної інформації, оцінювання ризиків, прогнозування операторських дій та підтримки прийняття рішень.

У роботі науково обґрунтовується нове концептуальне вирішення зазначеної проблеми управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, яке базується на системному включенні когнітивних, поведінкових і психофізіологічних характеристик оператора до контурів навігаційного забезпечення, інтелектуальної обробки інформації, оцінювання ризиків та підтримки прийняття рішень при управлінні рухом судна.

Водночас у сучасному судноводінні та системах навігаційного забезпечення зберігається низка невирішених або частково вирішених науково-практичних завдань:

– підвищення безпеки, стійкості та ефективності функціонування систем навігаційного забезпечення в умовах зростання інформаційного навантаження на оператора, ускладнення навігаційної обстановки, дефіциту часу на прийняття рішень та розширення застосування автоматизованих й інтелектуальних засобів керування;

– перехід від фрагментарного вдосконалення окремих технічних засобів навігації до комплексного управління ергатичною системою, у якій оператор, навігаційна інформація, ризики, режими керування та результати руху судна утворюють взаємопов’язаний функціональний контур.

Крім того, виявлено такі системні протиріччя:

– між зростаючою складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора, що унеможливлює гарантоване забезпечення високої якості своєчасних рішень лише за рахунок традиційних процедур навігаційного контролю;

– між об’єктивною потребою у розширенні автоматизації керування судном і варіативністю поведінки людини в ергатичній системі, яка не дає змогу переносити техноцентричні підходи на реальні умови судноводіння без адаптації до стану оператора;

– між накопиченням значних обсягів AIS/ECDIS-даних та недостатнім рівнем розвитку засобів їх інтелектуальної та адаптивної інтерпретації, придатної для діагностики станів, прогнозування дій оператора і підтримки прийняття рішень у реальному часі;

– між потребою у формалізованій діагностиці кваліфікаційного рівня, функціонального і психофізіологічного стану оператора та відсутністю належного модельного апарату, здатного інтегрувати поведінкові, часові та когнітивні ознаки в контур управління;

– між стрімким поширенням засобів підтримки на основі штучного інтелекту для підвищення безпеки судноплавства та недостатньою інтеграцією психофізіологічних характеристик операторів, через що поступово втрачаються професійні здібності операторів щодо виконання своїх функцій у складних навігаційних ситуаціях.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження відповідає стратегічним орієнтирам державної політики у сфері транспорту та морської діяльності, зокрема положенням Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, Морської доктрини України на період до 2035 року, а також міжнародним вимогам

безпеки мореплавства, закріпленим у SOLAS, STCW-78, ISM Code та документах IMO, у частині підвищення безпеки судноплавства, інтелектуалізації систем навігаційного забезпечення, розвитку автоматизованого керування рухом суден і зниження ризиків, пов’язаних із людським фактором.

Тема дисертаційної роботи пов’язана з виконанням 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.

Одержані під час виконання зазначених тем результати використано в дисертації при розробленні моделей і методів інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, ідентифікації когнітивних, поведінкових і психофізіологічних станів оператора, оцінювання ризиків людського фактора, побудови систем підтримки прийняття рішень та створення автоматизованих засобів управління рухом судна. У роботах, що виконувалися з 2020 року, автор брав участь як відповідальний виконавець окремих розділів проєктів, а в НДР «Розробка методів зниження впливу фактору людини в автоматизованих системах керування судном» (№ 0125U001788) – як керівник. Дослідження виконувалися на базі науково-дослідної лабораторії «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом судна» у 2020–2025 роках, де автор був керівником.

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.

Головними завданнями дослідження є:

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’єкт дослідження – ергатичні процеси управління навігаційним забезпеченням і рухом судна в умовах впливу людського фактора.

Предмет дослідження – 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 та прикладного експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів визначається вирішенням основних наукових завдань. У процесі виконання дослідження здобувачем особисто 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 складові ризику 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 мікроваріативності 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 дає змогу 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 мікроваріативність 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 ситуаціях.

Практичне значення одержаних результатів дослідження 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.

Практичні результати дисертаційного дослідження застосовуються:

– в освітньому процесі Херсонської державної морської академії (акт від 04.05.2026); Vilnius Gediminas Technical University, Lithuanian Maritime Academy (акт від 01.05.2026 р.).

– при проведенні тренажерної підготовки морських фахівців в спеціалізованих морських тренажерних центрах – Херсонському морському спеціалізованому тренажерному центрі (акт від 07.05.2026 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 автора. Дисертацію виконано автором самостійно. Автором здійснено пошук і критичний аналіз наукових джерел, виявлено

наявні проблеми та протиріччя, обґрунтовано шляхи їх подолання, сформульовано мету, гіпотезу та завдання дослідження. Здобувачем особисто розроблено методологічні засади, концептуальні моделі, методи та інформаційно-технологічні засоби управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора, а також створено процедури обробки навігаційних даних і відповідне програмне забезпечення. Одержані результати впроваджено в освітній, тренажерний і науково-дослідний процеси. У працях, опублікованих у співавторстві, у дисертації використано лише ті ідеї, положення та результати, що належать здобувачеві особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи, що стосуються методологічних засад управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, ідентифікації когнітивних, психофізіологічних і поведінкових станів оператора, оцінювання ризиків людського фактора, доповідалися, обговорювалися та пройшли апробацію на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: XI–XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT)», м. Херсон, 2019–2026 рр.; I–V Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI)», м. Херсон, 2021–2025 рр.; X, XII, XIV та XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, 2019, 2021, 2023, 2024 рр.; міжнародних морських науково-практичних конференціях «Marine Power Plants & Operation (MPP&O)», м. Одеса, 2024–2025 рр., а також у форматі Одеса–Стамбул–Одеса, 2019 р.; XI Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи і технології», м. Одеса, 2023 р.; 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, м. Вроцлав, Польща, 2023 р.; міжнародних науково-практичних конференціях «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика», м. Херсон, 2019–2021 рр.; XII–XIII Міжнародних науково-

практичних конференціях «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл, 2021–2022 рр.; International Conference on Advances in Computer Science for Engineering and Education (ICCSEEA 2021); міжнародних наукових заходах серії ISDMCI (2021, 2024), м. Херсон; I–II Міжнародних науково-практичних конференціях «Транспорт, порт, логістика, безпека: виклики сучасності та перспективи розвитку» (2023, 2024) м. Херсон; I–II Міжнародних науково-практичних конференціях «Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання» (2024, 2025) м. Одеса; I Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні та операційні технології в судноплавстві, IOTS-2026», м. Одеса.

Публікації. 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.

РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд проблеми та обґрунтування напряму дослідження ергатичних систем навігаційного забезпечення й управління рухом судна

1.1. Методологічні основи формування концептуальних моделей і методів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення

Праці, присвячені інтеграції ергономіки, підходів до зручності використання технічних засобів та інженерії людського фактора, формують вихідне методологічне підґрунтя для розроблення концептуальних моделей управління ергатичними системами навігаційного забезпечення [1–3]. Їхня принципова цінність полягає в тому, що людський фактор у них розглядається не як зовнішнє обмеження функціонування технічної системи, а як внутрішній структуроутворювальний параметр її архітектури. У такому ракурсі когнітивні можливості оператора, обмеження сприйняття, інформаційне навантаження та режими взаємодії з технічними засобами мають враховуватися вже на етапі структурного аналізу й синтезу динамічної ергатичної системи, а не лише під час подальшої експлуатаційної оцінки.

Узагальнення наведених положень дає змогу подати ІСНЗ як ергатичну систему, у якій зовнішнє навігаційне середовище, технічні засоби спостереження, інформаційне поле оператора, його когнітивно-поведінковий стан, контур формалізації людського фактора, оцінювання ризику та механізми рекомендаційної підтримки утворюють єдиний замкнений контур управління рухом судна (рис. 1.1).



Рисунок 1.1. Узагальнена структура ергатичної системи навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора

Схема відображає послідовну взаємодію зовнішнього навігаційного середовища, навігаційно-інформаційного контуру судна, інформаційного поля оператора, ергатичного контуру прийняття рішень, формалізації проявів людського фактора, оцінювання ризику, формування рекомендацій та впливу керувальної дії оператора на фактичний рух судна.

У межах цього дослідження терміни «управління» і «керування» використовуються як взаємопов’язані, але не тотожні.

Термін «управління» застосовується для позначення системного рівня організації функціонування ергатичної системи навігаційного забезпечення: формування інформаційного поля судноводія, оцінювання ризику, підтримки прийняття рішень у судноводінні, розподілу функцій між оператором і технічними засобами та забезпечення безпеки управління рухом судна.

Термін «керування» використовується у вужчому техніко-операційному значенні – для опису безпосередніх керувальних дій оператора або автоматизованої системи, режимів ручного чи автоматичного керування судном, а також параметрів зміни курсу, швидкості, траєкторії та роботи виконавчих засобів судна.

Подальший розвиток цієї логіки в морському середовищі представлено у працях, де людиноцентричне проєктування навігаційних систем і розподілена взаємодія між бортом та береговою підтримкою розглядаються як основа нової конфігурації системи «людина – судно – інфраструктура» [4, 5]. Наукова значущість цього блоку полягає в тому, що навігаційне забезпечення постає вже не як сукупність ізольованих технічних пристроїв, а як багатокомпонентна ергатична структура з розподіленими ролями, інформаційними потоками та зонами відповідальності. Подальшої формалізації потребують механізми адаптивного перерозподілу функцій між оператором, автоматизованими модулями та зовнішніми центрами підтримки залежно від навігаційної ситуації, рівня ризику, інформаційного навантаження та поточного стану оператора. Це визначає необхідність побудови адаптивної моделі взаємодії людини й автоматизованих засобів у структурі ІСНЗ.

Суттєвого поглиблення ця проблематика набуває в роботах, де доведено, що морські аварії мають не лише технічне, а й організаційне походження, а тренажерна підготовка розглядається як елемент системи формування безпечної операторської поведінки [6, 7]. Для методології ергатичних систем це означає, що функціональна надійність навігаційного забезпечення визначається не лише характеристиками технічних засобів, а й поведінковими моделями виникнення ризику, організацією вахтової діяльності, якістю підготовки та здатністю оператора діяти в умовах невизначеності. Наявні тренажерні технології створюють експериментальну базу для оцінювання стану й кваліфікаційної придатності оператора, однак потребують доповнення моделями безперервної діагностики безпосередньо в процесі управління судном. Відповідне завдання визначає один із напрямів подальшої формалізації поведінки оператора в ІСНЗ.

Актуальність управління ергатичними системами навігаційного забезпечення узгоджується з сучасною позицією Міжнародної морської організації щодо людського фактора в морській безпеці [8]. У резолюції IMO A.1197(34), прийнятій 3 грудня 2025 р., людський елемент визначено як складну багатовимірну категорію, що впливає на безпеку мореплавства та захист морського середовища і охоплює діяльність екіпажів суден, берегового управління, регуляторних органів, визнаних організацій, суднобудівних структур, законодавців та інших учасників морської діяльності (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, п. 1.2, Principles «a»). Така постановка виключає спрощене трактування людського фактора лише як індивідуальної помилки оператора й переводить його в площину системної взаємодії людини, технічних засобів, процедур, інформаційного середовища й організації управління.

У резолюції наголошено, що ефективні коригувальні дії після морських аварій потребують розуміння участі людського фактора в причинах аварій на основі системного аналізу чинників, що спричиняють їх, і причинно-наслідкового ланцюга подій (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, п. 1.2, Principles «c»). Отже, безпека судноплавства не може бути достатньо описана

лише технічною справністю судна або навігаційного обладнання. Вона формується через узгодженість дій оператора, інформаційних потоків, процедур, робочого навантаження, підготовленості екіпажу, умов експлуатації та здатності системи підтримувати своєчасне прийняття рішень.

Методологічно важливим є положення про здатність екіпажу підтримувати діяльність у межах безпечної продуктивності, яка залежить від індивідуальних можливостей, управлінських політик, досвіду, підготовки, професійних навичок і робочого середовища (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, п. 1.2, Principles «f»). У цілях Annex 6 також визначено потребу у структурованому підході до врахування людського фактора та формуванні рамки для цілісного і системного управління ризиками, що виникають унаслідок взаємодії операційних цілей, витривалості людини, організаційних процедур і факторів середовища (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, п. 1.2, Goals «a», «g»; Annex 6, п. 2.1). Це безпосередньо відповідає ергатичній природі навігаційного забезпечення, де оператор, технічні засоби, дані, процедури та ризик мають розглядатися в єдиному інформаційно-керувальному контурі.

Практична спрямованість цієї позиції розкрита через процедуру перевірки врахування людського фактора в діяльності операторів. Під час підготовки нового рішення мають бути ідентифіковані відповідні ризики, визначені способи їх врахування, залучена необхідна експертиза, а під час затвердження результату має перевірятися повнота їх опрацювання (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, пп. 3.2–3.10). Недостатнє врахування людського фактора прямо визначено як підстава для звуження відповідного напряму роботи IMO (IMO Resolution A.1197(34), Annex, розд. 8, п. 8.10.3; Annex 3, п. 8). Отже, людський фактор у сучасній міжнародній практиці є не допоміжним елементом, а критерієм прийнятності технічного, організаційного та регуляторного рішення.

Зміст контрольного переліку Annex 6 конкретизує ключові для ІСНЗ параметри: робоче навантаження у напружених фазах рейсу та портових операціях, часовий тиск, вплив на прийняття рішень на борту, зростання

розумового навантаження, потребу пошуку, перетворення та аналізу даних, ухвалення рішень за неповної інформації, обмеження часу для формування ситуаційної обізнаності, комунікації та перевірки дій (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, Appendix, Question 1, пп. 1.1–1.1.5; Question 2, пп. 2.1–2.6). Окремо виділено ризики нових технологій: складність експлуатації обладнання, зміна ролі людини-оператора, потреба в нових компетентностях, слабка інтеграція з наявними системами, незнайомі процедури та нові інтерфейси керування (IMO Resolution A.1197(34), Annex 6, Appendix, Question 4, пп. 4.1–4.8).

Емпіричне підтвердження актуальності системного врахування людського фактора в навігаційному забезпеченні наведено в аналітичному звіті European Maritime Safety Agency «Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2025» [9]. Звіт сформовано на основі даних European Marine Casualty Information Platform за період 2015–2024 рр. і охоплює морські аварії та інциденти, пов’язані із суднами під прапорами держав ЄС або подіями у територіальних та внутрішніх водах держав ЄС. За вказаний період у базі зафіксовано 26751 морську аварію та інцидент, з яких 2659 випадків припадають на 2024 р. Це свідчить про збереження сталої інтенсивності аварійності, незважаючи на розвиток навігаційних, інформаційних і технічних засобів судноводіння.

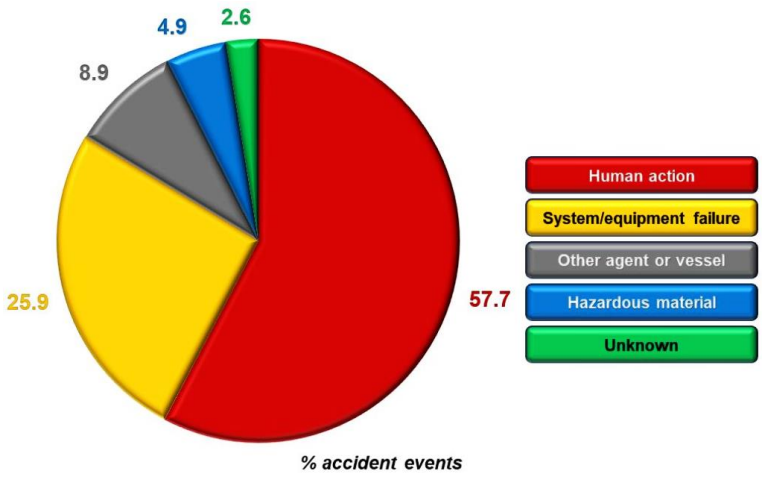


Рисунок 1.2. Розподіл типів аварійних подій у морських аваріях та інцидентах за даними EMSA 2025 [9, Fig. 2.7–1, p. 39]

За результатами аналізу EMSA, у структурі аварійних подій за 2015–2024 рр. найбільшу частку становлять дії людини – 57,7 %. Для порівняння, відмови систем або обладнання становлять 25,9 %, вплив іншого агента або судна – 8,9 %, небезпечні матеріали – 4,9 %, невизначені події – 2,6 %.

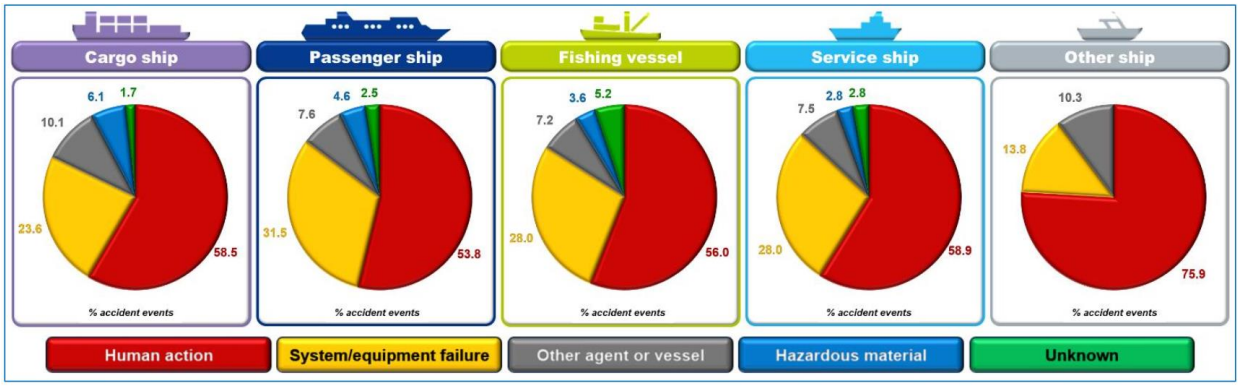


Рисунок 1.3. Структура аварійних подій за типами суден [9, Fig. 2.7–2, p. 39]

Наведений розподіл деталізує частку основних типів аварійних подій для різних категорій суден і підтверджує стійке домінування дій людини в причинній структурі аварійності. Для вантажних суден частка цієї категорії становить 58,6 %, для пасажирських – 53,8 %, для риболовних – 56,0 %, для сервісних – 58,9 %, а для інших типів суден – 75,9 %. Отже, вплив людського фактора не є локальним проявом окремого виду флоту, а має наскрізний характер для різних експлуатаційних умов судноплавства.

Наведені дані підтверджують актуальність визначення інформаційної системи навігаційного забезпечення саме як ергатичної системи. У такій системі людський фактор має бути не лише описаний як причина аварійності, а формалізований через показники стану оператора, якості прийняття рішень, часової напруженості, взаємодії з технічними засобами та динаміки навігаційного ризику.

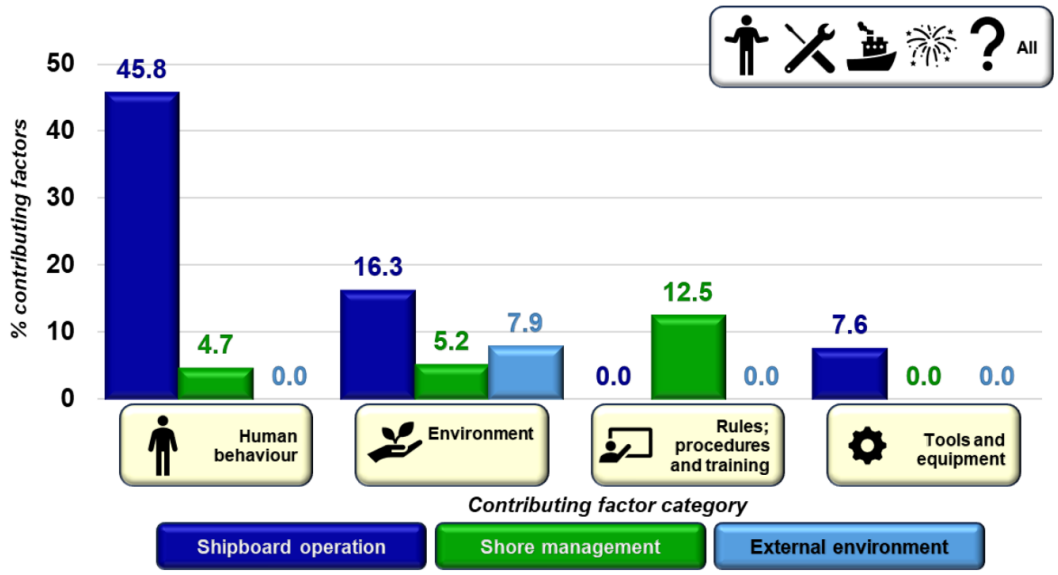


Рисунок 1.4. Структура сприяючих чинників морських аварій та інцидентів за категоріями і типами чинників за даними EMSA 2025 [9, Fig. 2.7–7, p. 41]

Отже, деталізація структури чинників морських аварій та інцидентів охоплює чотири категорії: поведінка людини, середовище, правила, процедури та підготовка, інструменти та обладнання. Найбільшу частку становить категорія поведінки людини – 50,5 %, з яких 45,8 % припадає на суднову експлуатацію, а 4,7 % – на берегове управління. Другою за значущістю є категорія середовища – 29,4 %, що формується через поєднання чинників суднової експлуатації, берегового управління та зовнішнього середовища.

Такий розподіл показує, що аварійність не зводиться лише до технічних відмов або зовнішніх умов плавання. Вона формується у взаємодії поведінкових, процедурних, організаційних, технічних і ситуаційних чинників, серед яких провідну роль відіграє людино-машинний контур експлуатації суден. Це безпосередньо підтверджує ергатичну природу системи навігаційного забезпечення та актуалізує необхідність формалізованого врахування стану оператора, якості його дій, робочого навантаження, інформаційного середовища і процедурної підтримки під час оцінювання навігаційного ризику.

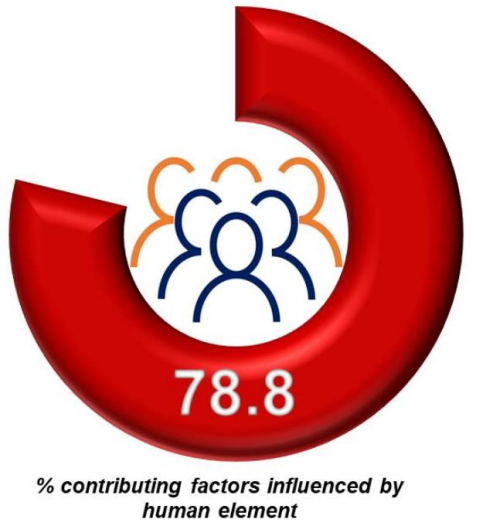


Рисунок 1.5. Частка сприяючих чинників, пов’язаних із людським елементом, за даними EMSA 2025 [9, Fig. 2.7–17, p. 44]

Узагальнений показник EMSA засвідчує, що 78,8 % проаналізованих сприяючих чинників перебувають під впливом людського елемента. Для окремих типів суден ця частка також залишається високою: для вантажних суден – 80,3 %, пасажирських суден – 78,5 %, сервісних суден – 74,7 %, риболовних суден – 73,0 %.

Отже, людський елемент має наскрізний характер і проявляється незалежно від типу судна.

Особливо важливим для задач навігаційного забезпечення є просторовий розподіл аварійності. За даними EMSA, у 2015–2024 рр. 51,7 % морських аварій та інцидентів сталися у внутрішніх водах, зокрема найбільша підкатегорія припадає на портові райони. У 2024 р. частка внутрішніх вод становила 53,2 %, з яких 35,7 % – портові райони.

Наведені дані EMSA 2025 підтверджують, що актуальність дослідження визначається не лише загальною значущістю людського фактора оператора, а й його стійкою присутністю у структурі причин аварійності.

Окремий напрям методологічного посилення пов’язаний із дослідженнями уніфікації морських даних, структуризації інформаційного обміну та формування спільної морської інформаційної архітектури в межах концепції e-Navigation [10]. Значення цих підходів полягає в тому, що навігаційна інформація розглядається не як розрізнений потік повідомлень, а як упорядкований ресурс взаємодії судна, берегових сервісів, систем моніторингу та підтримки прийняття рішень. Запропонована в межах e-Navigation ідея Common Maritime Data Structure створює передумови для стандартизованої циркуляції даних, зменшення інформаційної фрагментарності та підвищення узгодженості рішень у морському

інформаційному просторі. Для переходу від уніфікованої морської інформаційної архітектури до моделі ергатичного управління її необхідно поєднати з моделями поведінки оператора, оцінюванням навігаційного ризику, урахуванням ситуаційної невизначеності та механізмами адаптивного розподілу функцій у контурі «оператор – інформація – технічні засоби – навігаційне середовище».

Тому методологічна задача полягає у синтезі ергономічних, інформаційних, організаційних і керувальних рішень у межах інтегрованої концептуальної моделі управління ергатичною системою навігаційного забезпечення.

Важливим прикладом подальшого розвитку цієї логіки є підходи, у яких масиви AIS-даних використовуються для інтелектуальної морської навігації, аналізу траєкторної поведінки суден, виявлення нетипових режимів руху та підтримки диспетчерських рішень у складних акваторіях [86, 146]. У такій постановці навігаційна інформація набуває статусу активного ресурсу управління і включається до інформаційно-аналітичного циклу «дані – аналітична оцінка – управлінське рішення». Це означає перехід від традиційного диспетчерського супроводу, зорієнтованого на статичні правила визначення пріоритетів і фрагментарне використання інформації, до систем управління рухом, побудованих на безперервній просторово-часовій аналітиці руху суден. Проте такий контур залишається неповним без формалізованої моделі оператора, адаптивного інтерфейсу, оцінювання когнітивного навантаження та механізмів людино-машинної взаємодії. Відповідно, протиріччя між накопиченням значних масивів навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки долається лише частково, без повного врахування ергатичної складової ІСНЗ.

Особливо значущим для формування методології дослідження є блок праць, присвячених людино-машинній взаємодії, інтерфейсним аспектам роботи навігаційного містка, кооперації оператора з автоматизованими засобами та людському фактору в сучасному морському середовищі [11–13]. У цих роботах показано, що результативність навігаційної діяльності

визначається не лише технічними характеристиками автоматизації, а й узгодженістю інтерфейсу, рівнем когнітивного навантаження, режимами взаємодії, розподілом функцій і фактичною роллю оператора в контурі прийняття рішень. Зокрема, аналіз людино-машинної кооперації в морському транспорті [11], проблем інтерфейсу та організації роботи містка на великих пасажирських суднах [12], а також людського фактора у віддалених суднових операціях [13] підтверджує необхідність розглядати ІСНЗ як цілісний інформаційно-керувальний контур. У такому контурі технічна архітектура, структура інформаційних потоків, когнітивні ресурси оператора, поведінкові реакції та режими підтримки рішень перебувають у взаємній залежності. Зазначені дослідження формують технологічну основу ергатичної взаємодії, яку в межах цього дослідження доповнено формалізацією стану оператора, ризику та адаптивного системного реагування.

Другий змістовий пласт цього напряму становлять дослідження пояснюваного штучного інтелекту, автономного судноплавства, гібридної кооперації людини й автономних надводних морських суден (MASS), а також автоматизованого уникнення зіткнень в умовах людино-машинної взаємодії [14–18]. У цих працях показано, що подальший розвиток навігаційного забезпечення пов’язаний не лише з підвищенням рівня автоматизації, а й із забезпеченням зрозумілості рішень штучного інтелекту для оператора [14], формуванням перспективної архітектури управління морським рухом автономних суден [15], інтегрованим аналізом безпеки й ефективності взаємодії людини з MASS [16, 216], а також розробленням засобів уникнення зіткнень у режимі людино-машинної кооперації [17, 18]. Методологічна цінність цього блоку полягає у переході від аналізу окремих технічних рішень до архітектурного опису майбутніх ергатичних систем навігаційного забезпечення, у яких автоматизація, зрозумілість, роль оператора, правила розходження та алгоритми підтримки рішень розглядаються як взаємопов’язані складові. Водночас у цих підходах ще недостатньо інтегровано поведінкову варіативність оператора, його кваліфікаційний

рівень, психофізіологічний стан і механізми адаптивного системного втручання залежно від поточної навігаційної ситуації.

Третій важливий блок становлять праці, у яких компетентності оператора-судноводія, експертне знання та якість оцінювання ризику розглядаються як складові підтримки прийняття рішень у суднових операціях [19–21]. Аналіз компетентностей у динамічній людино-машинній системі [19], використання експертного знання для побудови морських систем підтримки рішень [20] та оцінювання якості аналізу ризику на основі експертного розгляду [21] підводять до необхідності формалізації не лише технічних сценаріїв, а й кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора. Для ризик-орієнтованих ергатичних контурів це означає перехід від моделі зовнішнього користувача до моделі оператора як активного компонента ІСНЗ. У такій моделі кваліфікація, стиль прийняття рішень, рівень надійності та здатність діяти в умовах невизначеності мають бути включені до логіки управління. Водночас у наявних дослідженнях компетентності, експертні знання та оцінювання ризику переважно розглядаються окремо, без повного поєднання з потоковими навігаційними даними, інтелектуальною обробкою інформації та адаптацією рекомендацій у реальному часі.

Узагальнення зазначених підходів показує, що наявні дослідження частково послаблюють вихідні протиріччя: між зростаючою складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора; між необхідністю автоматизації керування судном і варіативністю поведінки людини в ергатичній системі; між накопиченням значних масивів навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки; між потребою в точній діагностиці кваліфікаційного рівня оператора та відсутністю формалізованих моделей його поведінки; між вимогами до безпеки судноплавства та недостатньою інтеграцією психофізіологічних параметрів у системи підтримки прийняття рішень.

Саме тому науково обґрунтованою є постановка задачі формування концептуально-методологічної основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, яка поєднує структурований інформаційний

простір, інтелектуальну обробку навігаційних даних, людиноцентричне подання діяльності оператора, непряму оцінку його поведінкових проявів, механізми підтримки прийняття рішень і процедури ризик-орієнтованого реагування в межах ІСНЗ. Ця методологічна основа надалі конкретизується через побудову моделей, методів і процедур експериментальної верифікації ергатичних систем навігаційного забезпечення.

1.2. Концептуальні моделі інтелектуальної технології обробки навігаційної інформації та прогнозування дій оператора

Праці, присвячені багатомасштабній обробці сигналів, фрактальним підходам до оцінювання морського транспортного ризику, розпізнаванню траєкторних патернів, формоорієнтованій інтерпретації руху суден, просторово-часовій організації траєкторних даних та аналізу аварій, пов’язаних з ECDIS, формують вихідне наукове підґрунтя для побудови концептуальних моделей інтелектуальної обробки навігаційної інформації [22–27]. Їх сукупна методологічна цінність полягає у переході від первинних навігаційних даних до структурованого простору ознак, придатного для подальшої аналітичної інтерпретації. Зокрема, вейвлет-аналіз обґрунтовує можливість багатомасштабного аналізу, фільтрації та виділення інформативних ознак зі складних часових рядів [22], фрактальні моделі підтверджують прогностичний потенціал фрактальної обробки часових рядів морського транспортного ризику [23], а формоорієнтовані методи засвідчують придатність форми руху як обчислювального представлення навігаційної поведінки [24, 26]. Водночас просторово-часова індексація траєкторій [25] та причинний аналіз ECDIS-асоційованих аварій [27] розв’язують задачі просторово-часової організації та причинного аналізу траєкторних даних, тоді як прогнозування дій конкретного оператора потребує додаткового поведінкового рівня моделі. Отже, вже на цьому етапі виявляється нерозв’язана частина протиріччя між наявністю великих масивів навігаційної інформації та недостатністю інтелектуальних засобів її адаптивної обробки, а також між необхідністю автоматизації керування та недостатньою

формалізацією поведінкового компонента ергатичної системи.

Особливо методологічно значущим є напрям, у якому фрактальні ознаки використовуються як інформативні дескриптори для задач класифікації складних об’єктів, а багатомасштабна обробка сигналів розглядається як базовий етап формування стійких аналітичних ознак [28–30]. У цьому контексті фрактальні підписи підтверджують придатність геометрично складних структур до статистичного та машинного розпізнавання [28], кореляційні фрактальні розмірності – можливість виявлення прихованої динаміки процесу й ознак наближення до нестійких станів [29], а поєднання фрактального аналізу з вейвлет-декомпозицією – доцільність побудови послідовного аналітичного конвеєра «нормалізація – багатомасштабне розкладання – виділення ознак – інтерпретація» [30]. Для морської безпеки ці підходи мають значення як формально-методична основа подальшої адаптації фрактального апарату до аналізу AIS/ECDIS-рядів, зокрема для переходу від узагальненого опису траєкторії до виявлення мікродинаміки руху та латентних змін режиму керування. Наступним методологічним кроком є перенесення фрактальних методів на навігаційні часові ряди з пов’язуванням отриманих індикаторів зі станом системи, рішеннями та поведінковим профілем оператора.

Важливу прикладну лінію формують праці, присвячені дистанційним технологіям керування автономними надводними суднами, математичному моделюванню процесів судноводіння, застосуванню нечітких регуляторів та розпізнаванню морських об’єктів за радіолокаційними даними [31–34]. Ці дослідження задають модельно-алгоритмічний контур інтелектуалізації суднового керування, у якому навігаційна інформація використовується для формування керувальних впливів у реальному або наближеному до реального часу режимі. Зокрема, дистанційні технології та системи курсового керування автономних суден [31], математичні моделі процесу керування [32], нечіткі регулятори автоматичного руху судна [33] і радіолокаційне розпізнавання автономних морських об’єктів у складному середовищі [34] підтверджують технічну досяжність автоматизованого навігаційного контуру. Водночас ці

підходи переважно зосереджені на технічній стороні керування і не інтегрують поведінкові дескриптори оператора, ознаки мікродинаміки його дій та алгоритми виявлення зміни стилю керування. Отже, технічний контур автоматизованого керування має бути доповнений поведінковими дескрипторами оператора та алгоритмами виявлення зміни стилю керування рухом судна.

Подальший розвиток цього напряму пов’язаний із побудовою моделей, у яких навігаційний рейс розглядається не лише як неперервна траєкторія, а як структурований простір ознак, що поєднує фрактальні індикатори, локальні патерни руху та дискретизовані коди мікродинаміки. Такий підхід створює передумови для класифікації рейсів, виявлення локальної варіативності траєкторії та ризик-орієнтованої інтерпретації навігаційних ознак. У цьому контексті формоорієнтовані методи, кластеризація AIS-траєкторій, виявлення аномалій, прогностичні моделі та фрактальні індикатори формують компоненти загального аналітичного конвеєра для обробки траєкторних даних [35–45]. Зокрема, підходи до прогнозування траєкторій на основі просторово-часових ознак AIS-даних [35–37], динамічна кластеризація, інтегрована візуалізація та виявлення аномалій [38, 39], а також LSTM-моделі, графові просторово-часові архітектури, ймовірнісні дифузійні моделі та пояснювані data-driven моделі динаміки судна [40–43] засвідчують перехід від традиційної траєкторної аналітики до машинного навчання й імовірнісного прогнозування руху суден. Водночас фрактальні мікроознаки та вдосконалені варіанти фрактальної розмірності [44, 45] у цьому блоці доцільно розглядати як формально-методичну основу для подальшої побудови локального простору ознак. Проте наявні підходи переважно орієнтовані на довгі траєкторії, агреговані ряди або загальні прогностичні моделі, тоді як інтерпретований простір фрактальних мікроепізодів, символічних кодів і повторюваних структурних подій руху ще не сформований як завершений інструмент для діагностики поведінкових характеристик оператора. Саме цей недолік є принциповим для подолання протиріччя між великими масивами навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки, а

також між потребою в діагностиці поведінки оператора і відсутністю формалізованих моделей її траєкторного прояву.

Методологічно важливим є блок праць, у яких AIS розглядається як базове джерело навігаційної інформації, що потребує доповнення локальними, більш інформативними дескрипторами руху [44–50]. Формально-методичні аналоги, праці [44, 45] підтверджують чутливість фрактальних показників до локальної мікродинаміки та багатомасштабних змін сигналу, що створює підстави для адаптації відповідного апарату до аналізу мікроваріативності руху судна. Праці, присвячені просторовому аналізу перетинів курсів суден, ідентифікації високоризикових об’єктів, злиттю AIS із сонарною та іншою просторово-часовою інформацією, ситуаційній обізнаності й стратегіям зниження ризику зіткнень [46–50], підтверджують необхідність переходу від агрегованого AIS-потоку до локалізованих ознак поведінки судна. У цьому контексті фрактальні мікроепізоди, символічні коди та метрики подібності між рейсами доцільно розглядати як перспективний ознаковий шар моделі, що доповнює класичні кінематичні, статистичні та ризик-орієнтовані показники.

Окремий прогностично значущий блок формують праці, пов’язані з формалізацією ситуації, ситуаційною обізнаністю, мультимодальними інтерфейсами, кількісним оцінюванням уваги, компетентнісно-психофізіологічним аналізом і злиттям інформації [51–59]. Ситуації та моделі ситуаційної обізнаності створюють основу для структурованого подання навігаційної інформації та її інтерпретації в термінах ситуаційних моделей [51, 52]. Водночас семантичне і онтологічне представлення знань саме по собі не забезпечує прогнозування дій оператора без поєднання з потоковими навігаційними даними та поведінковими моделями. Дослідження змішаної реальності у підготовці морських фахівців підтверджують залежність якості сприйняття ситуації від способу подання інформації, але залишаються переважно в межах навчального середовища [53]. Кількісні моделі ситуаційної обізнаності, мультимодальні інтерфейси та байєсівське оцінювання ситуаційної обізнаності судноводія [54–56] формують передумови для data-driven аналізу операторської діяльності. Їх інтеграція із ситуаційним

контекстом, сенсомоторною реакцією, показниками уваги та навігаційними параметрами дасть змогу сформувати єдиний прогностичний механізм операторської діяльності. Психофізіологічне оцінювання розумового навантаження, стресу й уваги суднових операторів у тренажері навігаційного містка підсилює цю лінію [57], оскільки переводить стан оператора в площину вимірюваних індикаторів. Лінія злиття інформації [58] підтверджує необхідність синхронізації неоднорідних інформаційних потоків, а моделі відновлення ситуаційної обізнаності [59] вказують на значення механізмів втрати й відновлення контексту. Разом із тим ці підходи ще потребують інтеграції з потоковими AIS/ECDIS-даними, поведінковими ознаками та моделями прогнозування дій оператора в реальному навігаційному контурі.

Особливий напрям формують дослідження, у яких інтелектуальні та аналітичні технології поєднуються з оцінюванням емоційного стану оператора, імовірності людської помилки, безпечних параметрів руху, AIS-індикаторів ризику, провідних індикаторів безпеки, вимог безпеки, метеорологічних чинників аварійності та нейромережевої обробки навігаційних даних [60–68]. Їх методологічна цінність полягає в переході від суто кінематичного опису руху до врахування стану оператора, умов середовища, конфігурації ризику та інформаційних ознак навігаційної ситуації. Зокрема, вплив емоційного стану оператора на результативність дій [60], кількісне оцінювання ймовірності людської помилки [61; 62], визначення безпечних параметрів руху в складних погодних умовах [63], статистичні AIS-індикатори ризику [64], випереджальні індикатори безпеки [65], роль людського фактора і культури безпеки [66], вплив метеоумов на аварійність [67] та нейромережева обробка навігаційних даних [68] створюють передумови для формування комплексного інтелектуального контуру оцінювання ризику. Водночас ці дослідження залишаються фрагментарними: одні зосереджені на ризику, інші – на стані оператора або умовах середовища, ще інші – на алгоритмічній обробці даних, але не формують єдиної моделі, у якій навігаційна телеметрія, психофізіологічні чинники, сприйняття небезпеки

та прогнозування рішень поєднувалися б у межах одного аналітичного контуру.

Отже, проаналізований перелік джерел засвідчує, що сучасна наука накопичила суттєвий доробок у суміжних напрямах: багатомасштабній обробці сигналів, фрактальному аналізі, формоорієнтованій інтерпретації траєкторій, кластеризації та виявленні аномалій за AIS-даними, злитті інформації, кількісному моделюванні ситуаційної обізнаності, нейромережевій обробці навігаційних даних, психологічному й психофізіологічному аналізі операторської діяльності та прогнозуванні руху суден методами машинного навчання. Проте ці результати переважно залишаються роз'єднаними: одні описують рівень обробки сигналів або траєкторний рівень, інші – ризик, ще інші – поведінкові чи психофізіологічні аспекти діяльності оператора. У термінах наукової проблеми це означає, що наявні підходи лише частково послаблюють протиріччя між складністю навігаційного середовища і когнітивними ресурсами оператора, між автоматизацією керування і варіативністю людської поведінки, між великими масивами навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки, а також між потребою в діагностиці кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора та недостатньою формалізацією його дій. Саме тому науково обґрунтованою є побудова цілісної концептуальної моделі інтелектуальної обробки навігаційної інформації, у якій нормалізація AIS/ECDIS-даних, виділення фрактальних, символічних, кінематичних і часових ознак, багатомасштабний аналіз, оцінювання ризику та непряма інтерпретація поведінкових проявів оператора інтегруються в єдиний відтворюваний аналітичний контур.

1.3. Теоретичні засади ідентифікації когнітивних і психофізіологічних станів оператора в процесах управління рухом судна

Праці, присвячені психологічному моделюванню психічних станів, ролі людського фактора в морській безпеці, зв'язку цифрових слідів руху судна з аварійністю та концепції провідних індикаторів безпеки, формують вихідне

теоретико-аналітичне поле для подальшої формалізації когнітивних і поведінкових станів оператора [69–72]. Їхня методологічна цінність полягає в переході від узагальненого трактування людського фактора до розгляду стану оператора як багатокомпонентної структури, що має власні змінні, динаміку та зовнішні прояви у діяльності. Зокрема, психологічне моделювання психічних станів [69], аналіз людського фактора в морській безпеці [70], статистичне зіставлення AIS-індикаторів із навігаційними аваріями [71] та використання провідних індикаторів для прогнозування ризику [72] створюють передумови для непрямої ідентифікації небезпечних станів оператора. Водночас ці результати необхідно подати у вигляді формального апарату, який дозволяв би ідентифікувати стан уваги в динаміці навігаційної вахти за сукупністю поведінкових, сенсомоторних і навігаційних ознак. Отже, на цьому рівні виявляється протиріччя між зростаючою складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора, а також між потребою в діагностиці його кваліфікаційно-поведінкового рівня та недостатньою формалізацією моделей поведінки.

Подальше поглиблення цієї проблематики пов’язане з дослідженнями часової дисторсії, у яких суб’єктивне сприйняття часу розглядається як індикатор внутрішнього когнітивного, емоційного та психофізіологічного стану суб’єкта [73–78]. Ергономічні та психологічні праці цього напряму показують, що в умовах стресу [73], когнітивного викривлення робочого часу [74], загрози й негативного емоційного збудження [75], емоційного впливу на оцінювання тривалості [76] та індивідуальної вразливості до суб’єктивної часової дисторсії [77] змінюються часові характеристики сприйняття ситуації. Для навігаційної діяльності це має принципове значення, оскільки дефіцит часу, помилкова оцінка тривалості події, запізнення реакції або передчасний маневр безпосередньо впливають на якість ситуаційної обізнаності, своєчасність прийняття рішення та надійність керування судном. Концепція суб’єктивної ентропії [78] додатково розширює цей підхід, оскільки дає змогу трактувати внутрішню невизначеність вибору як формалізовану характеристику суб’єкта прийняття рішень. У морському контексті зазначені

положення мають бути інтегровані в модель, яка пов’язує часову дисторсію, увагу, упевненість, ризик і поведінкові прояви з параметрами руху судна. Отже, для ІСНЗ методологічно важливим є перехід від опису часової дисторсії як психологічного феномену до її використання як непрямої ознаки зміни стану оператора, що може бути зіставлена з часовими, траєкторними та ризик-орієнтованими параметрами навігаційної ситуації.

Важливий блок досліджень пов’язаний зі спробами включити стан оператора до систем управління безпекою судна через поєднання моделей зовнішнього навігаційного ризику, людського фактора, траєкторної поведінки та психофізіологічних індикаторів [79–89]. У цьому напрямі особливо чітко проявляється розрив між високим рівнем формалізації зовнішньої небезпеки та недостатньою формалізацією внутрішнього стану оператора. Так, моделі оцінювання ризику зіткнення на основі DCPA, TCPA та CRI [79] алгоритмізують небезпечну конфігурацію руху, але не враховують когнітивний, мотиваційний і психофізіологічний стан судноводія; дослідження автономного та дистанційного судноводіння [80, 81] показують збереження критичної ролі людини навіть за високого рівня автоматизації; HFACS-моделі, статистичний аналіз аварійності та праці про людський фактор у морських інцидентах [82–85] підтверджують системну значущість людського компонента, але переважно залишаються на рівні післяаварійного структурування причин; аналіз поведінки навігаторів за AIS-даними [86] дає змогу трактувати траєкторію судна як цифровий слід операторської діяльності, однак сам по собі не дає прямого доступу до внутрішніх станів оператора. Праці, присвячені управлінню морською безпекою з урахуванням людського фактора [87], кібербезпеці морських кіберфізичних активів [88] та загальнопсихологічним корелятам психологічної безпеки [89], розширюють контекст дослідження, однак не формують завершеної моделі діагностики поведінки оператора в реальному часі. Отже, подальшого розвитку потребує багатоканальний підхід, у якому AIS-дані, часові й поведінкові ознаки, експертні оцінки та психофізіологічні індикатори поєднуються в єдиному

формальному контурі непрямої ідентифікації когнітивних і функціональних станів оператора.

Перехідну, але концептуально важливу ланку становлять дослідження, у яких аналіз людського фактора пов’язується з моделями прийняття рішень, інформаційним середовищем, структурою інтерфейсу, математичним поданням простору станів та психофізіологічними характеристиками морських фахівців [90–97]. Зокрема, багатошарові моделі прийняття рішень [90], праці щодо ролі навігаційної інформаційної системи, ергономіки інтерфейсу та оптимізації відображення навігаційної інформації [91–93, 257] показують, що стан оператора формується не ізольовано, а під впливом зовнішнього інформаційного навантаження, структури подання даних і умов взаємодії з технічними засобами. Математичний апарат груп і графів Келі [94, 172] у цьому контексті може розглядатися як формальна основа для подання простору станів і зв’язків між ними, однак потребує наповнення реальними когнітивними, поведінковими та психофізіологічними даними. Праці, присвячені емоційно-особистісним і психофізіологічним реакціям морських фахівців на стресові чинники, а також оцінюванню вахтових офіцерів у тренажерному середовищі [95–97], підтверджують можливість використання таких реакцій як джерела даних для непрямого виявлення прихованих станів оператора. Поєднання зазначених підходів створює основу цілісної моделі автоматизованого розпізнавання уваги, мотивації, стресу та емоційного напруження в потоковому навігаційному контурі. Отже, для ІСНЗ принциповим є поєднання інформаційного навантаження, застосування інтерфейсів НІС, математичного простору станів і психофізіологічних проявів оператора в єдиній формалізованій моделі.

Одним із найбільш прикладно придатних напрямів є дослідження втоми як функціонального психофізіологічного стану, що проявляється через сенсорні, організаційні, біоритмічні, фізіологічні та поведінкові індикатори [98–105]. У цьому переліку праць показано, що якість операторської діяльності залежить від акустичного й комунікативного навантаження [98], режимів праці та відпочинку [99], фізіологічних проявів втоми моряків [100],

системної сукупності чинників, які зумовлюють втому екіпажу [101], біоритмічних змін і температурної динаміки організму [102], тривалого навантаження в критичних технічних системах [103], можливості неінвазивного розрізнення сонливості та ментальної втоми [104], а також впливу змінної роботи на функціональний стан операторів [105]. Для ІСНЗ це має принципове значення, оскільки втома може розглядатися не як фоновий чинник, а як діагностований стан, що впливає на увагу, швидкість реакції, точність сприйняття навігаційної інформації та надійність прийняття рішень. Водночас наявні дослідження переважно розглядають окремі аспекти втоми – фізіологічні, організаційні, біоритмічні або поведінкові – і ще не утворюють єдиного діагностичного контуру, у якому ці прояви поєднуються з часовими, сенсомоторними та навігаційними параметрами діяльності оператора.

Отже, проаналізований перелік джерел засвідчує, що сучасна наука сформувала кілька важливих напрямів дослідження внутрішніх станів оператора: психологічне моделювання психічних станів, аналіз уваги, часової дисторсії, суб’єктивної ентропії, людського фактора в аварійності, поведінкової профілізації за AIS-даними, формалізації мотиваційних станів та ідентифікації втоми за фізіологічними, поведінковими й сенсомоторними ознаками. Проте ці напрями здебільшого розвиваються окремо: одні описують психологічні феномени, інші – зовнішні поведінкові прояви, ще інші – окремі фізіологічні маркери. Унаслідок цього досі не сформовано цілісної моделі непрямої ідентифікації когнітивних і психофізіологічних станів оператора за сукупністю навігаційних, часових, поведінкових та експериментальних індикаторів. У термінах наукової проблеми це означає, що наявні підходи лише частково послаблюють протиріччя між складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора, між необхідністю діагностування кваліфікаційно-поведінкового рівня судноводія та недостатньою формалізацією моделей його дій, а також між вимогами до безпеки судноплавства і недостатньою інтеграцією психофізіологічних параметрів у системи підтримки рішень.

1.4. Моделі та методи управління ризиками прояву людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення

Наукові публікації, присвячені автоматизації процесів управління рухом судна, обробці AIS-даних для оцінювання навігаційних ризиків, інтелектуальному попередженню зіткнень і небезпечних зближень, інтегральним індексам безпеки судноводіння, системам підтримки рішень та засобам моніторингу психофізіологічного стану оператора [106–111], формують важливе підґрунтя для дослідження ризиків людського фактора. Їх комплексне поєднання в межах ергатичної системи навігаційного забезпечення дає змогу перейти від післяаварійного аналізу окремих помилок до динамічного виявлення, прогнозування та корекції ризикових режимів у контурі «судно – оператор – інформаційне середовище – ергатична система».

Зокрема, дослідження глибинного навчання для автономного судноводіння [106] переконливо показують, що сама по собі автоматизація не усуває ризик, якщо не враховано механізмів взаємодії людини й автоматики та можливих помилок інтерпретації COLREG у складних ситуаціях. AIS-базовані підходи до оцінювання ризику зіткнення і посадки на мілину [107] формують сильний інструментарій зовнішнього ризик-аналізу, однак не пов’язують ризикову конфігурацію руху з індивідуальною динамікою рішень оператора. Інтелектуальний метод уникнення зіткнень, що враховує навігаційний досвід і правила розходження суден [108], індексні підходи до оцінювання безпеки [109], засоби підтримки рішень під час уникнення зіткнень [110] та окорухові індикатори когнітивного навантаження оператора [111] підсилюють окремі сторони цього контуру, але ще не утворюють цілісної моделі, у якій зовнішній ризик, внутрішній стан оператора і механізми системного втручання аналізуються спільно. Саме тому ризик людського фактора в ергатичній системі повинен розглядатися не як наслідок помилки, встановлений постфактум, а як об’єкт формально-методологічного управління, де штатні та нетипові сценарії реагування ідентифікуються, прогнозуються та співвідносяться з необхідністю посилення контролю або переходу до захисного режиму.

Подальше методологічне поглиблення цієї логіки відбувається в працях, присвячених декомпозиції людського фактора, кількісному оцінюванню людської помилки, аналізу взаємодії людини й автоматики, FRAM-аналізу, технічному виявленню колізійних ситуацій, імовірнісному оцінюванню морських небезпек та використанню класичного інформаційного контуру ECDIS/ARPA [112–120]. Їхнє значення для управління ризиками людського фактора полягає в переході від загального опису небезпеки до структурованого, обчислюваного й процедурно організованого аналізу ризикових ситуацій. Зокрема, HFACS-підходи до аналізу аварій пасажирських суден [112] систематизують причинні рівні людського фактора, але переважно залишаються післяаварійним інструментом; кількісне оцінювання людської помилки в суднових операціях і операціях динамічного позиціонування [113, 114] підтверджує можливість формалізації операторських збоїв, однак ще не пов’язує ці оцінки з потоковими навігаційними даними та сценаріями захисного втручання; дослідження взаємодії людини й автоматики [115] та FRAM-аналіз морських аварій [116] вказують на контур взаємодії людини, технічної системи й операційного середовища. Технічні підходи до виявлення ситуацій зіткнення [117], імовірнісні моделі посадки на мілину [118], класичні засоби радарного й ARPA-супроводу [119] та маршрутні моделі уникнення зіткнень у середовищі ECDIS [120] формують інструментальну основу для зовнішнього оцінювання ризику. Водночас ці підходи ще не пояснюють, як саме когнітивні, часові та поведінкові зміни в діяльності оператора переводять навігаційну ситуацію в критичний режим. Отже, наявний доробок потребує розвитку в напрямі моделі, яка поєднує виявлення небезпечної конфігурації руху з ранньою діагностикою втрати оператором контролю над ситуацією, посиленням вахтового контролю та адаптивним автоматизованим втручанням.

Особливо методологічно значущим є напрям, у якому ризик людського фактора інтерпретується через суб’єктивну ентропію, провідні індикатори безпеки, культуру безпеки, втому, психологічну стійкість та когнітивні механізми оператора [121–128]. У цьому блоці відбувається перехід від розуміння помилки як окремої події до трактування ризику як процесу

поступового наростання внутрішньої невизначеності, зниження функціональної стійкості та послаблення контролю над ситуацією. Зокрема, концепція суб'єктивної ентропії [121] дає змогу формалізувати невизначеність вибору в діяльності оператора; підходи до провідних індикаторів безпеки [122] орієнтують аналіз на раннє виявлення небезпечних тенденцій; дослідження культури безпеки та людського елемента в судноплавстві [123, 127, 128] підкреслюють організаційний і поведінковий характер ризику; праці щодо втоми й психологічного благополуччя моряків [124, 125] показують наявність функціональних і психофізіологічних передумов небезпечних станів; когнітивні моделі уваги, пам'яті та ментальних структур оператора в безпекокритичних системах [126] підтверджують можливість формального подання внутрішніх механізмів операторської діяльності. Водночас ці дослідження ще недостатньо інтегровані в моделі оперативного управління ризиком, де внутрішній стан оператора, поточні навігаційні параметри, часові характеристики реагування, поведінкові патерни та режими системної підтримки аналізуються в межах єдиного ергатичного контуру.

Отже, проаналізований перелік джерел засвідчує, що сучасна наука сформувала кілька важливих напрямів знань для управління ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення: автоматизовані засоби судноводіння й уникнення зіткнень, AIS- та ECDIS-орієнтовані моделі зовнішнього ризику, кількісне оцінювання людської помилки, HFACS і FRAM-підходи, психофізіологічні індикатори навантаження та втоми, провідні індикатори безпеки, культура безпеки й когнітивні моделі операторської діяльності. Проте ці результати залишаються фрагментованими: одні описують зовнішню небезпеку, інші – структуру причин аварій, треті – психофізіологічні передумови ризику або організаційні чинники безпеки. Унаслідок цього цілісні моделі, у яких зовнішній навігаційний ризик, внутрішній стан оператора, поведінкові ознаки керування, часові характеристики реагування та механізми адаптивного втручання системи розглядаються спільно, ще недостатньо представлені. У термінах наукової проблеми це означає, що наявні підходи лише частково послаблюють

протиріччя між автоматизацією керування судном і варіативністю людської поведінки, між великими масивами навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки, між потребою в діагностиці кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора та недостатньою формалізацією його реакцій, а також між вимогами до безпеки судноплавства й обмеженою інтеграцією психофізіологічних параметрів у системи підтримки рішень. Саме тому науково обґрунтованою є побудова інтегрованих моделей і методів оцінювання, прогнозування та ризик-орієнтованого реагування на прояви людського фактора, у яких стан навігаційної ситуації, поведінкові ознаки керування, рівень ризику, режим підтримки прийняття рішень і можливі коригувальні дії розглядаються як взаємопов’язані елементи управління безпекою ІСНЗ.

1.5. Експериментально-прикладні дослідження автоматизованих систем управління рухом судна та засобів навігаційного забезпечення

Міжгалузеві дослідження надлишкового керування, резервованих виконавчих структур та оптимального розподілу керувальних впливів [129–135] формують загальнотехнічне підґрунтя для адаптації принципу надлишковості до автоматизованих систем керування судном. Безпосередній морський контекст цього напряму представлено у працях [136, 137].

Їхня наукова цінність полягає в тому, що надлишковість розглядається не лише як засіб відмовостійкості, а і як активний ресурс підвищення маневрової точності, керованості, енергетичної доцільності та стійкості автоматизованого контуру. Зокрема, відмовостійке керування апаратами з надлишковими рушіями [129], системи з резервованими приводами [130, 131], оптимізація сенсорних масивів [132], локальне планування руху та використання надлишкових ступенів свободи в робототехнічних системах [133–135] підтверджують універсальність надлишковості як механізму розподілу керувальних впливів, уникнення небажаних режимів і підвищення якості функціонування технічної системи. Для морської тематики це створює передумови для переходу від трактування надлишковості як резервної

властивості до її використання як інструмента автоматизованого маневрування. Тренажерне оцінювання протизіткнювальних дій навігатора в середовищі K-Sim Polaris [136] та прикладні моделі маневрування з урахуванням положення полюса повороту судна [137] додатково пов’язують цю логіку із судновим контекстом. Водночас у морській галузі ще зберігається потреба в інтеграції резервованих вимірювальних і виконавчих структур у єдиний контур автоматизованого керування судном, де надлишковість забезпечує не лише збереження працездатності, а й оптимізацію керувальних впливів, зменшення дрейфу, підвищення швидкодії та зниження залежності безпеки від нестійких проявів людського фактора.

Важливий напрям експериментально-прикладних досліджень становлять праці, у яких інтелектуальні навігаційні модулі, ризикові оцінки та засоби моніторингу розглядаються як інструменти підвищення ефективності навігаційного забезпечення й управління безпекою судноводіння [138–142]. У цьому блоці дослідження ефективності інтелектуальних систем моніторингу навігаційної інформації [138], COLREG-узгоджених модулів попередження небезпечних зближень [139], нечітко-баєсівських моделей стійкості морських транспортних систем [140], AIS-орієнтованого оцінювання критичних неаварійних подій [141] та інтегрованих динамічних моделей ризику судна [142] формують аналітичний інструментарій для сучасних ІСНЗ. Їхня методологічна цінність полягає в переході від ізольованих алгоритмів до комплексного оцінювання навігаційної ситуації, ризику, правил розходження та інформаційної підтримки оператора. Водночас значна частина таких рішень залишається на рівні інформаційно-аналітичних, імітаційних або обчислювальних моделей і ще потребує подальшої верифікації в спеціалізованому тренажерному, напівнатурному або експериментальному середовищі. Саме тому для цього напряму принциповим є поєднання аналітичних моделей ризику, COLREG-орієнтованих алгоритмів, AIS/GNSS-даних, сенсорних каналів, автопілотних модулів і обчислювальних засобів у єдиному контурі перевірки працездатності. Така постановка створює методологічну основу для подальшої верифікації розроблених моделей і

програмних засобів ІСНЗ у тренажерному та інформаційно-аналітичному середовищах.

Один із найбільш змістовно наповнених прикладних блоків становлять праці, присвячені автоматичному уникненню зіткнень, плануванню безпечної траєкторії, AIS-базованій інтелектуалізації навігації та алгоритмічній перевірці модулів розходження суден [143–152]. У цьому напрямі глибинне Q-навчання для багатосуднових сценаріїв [143], прогнозування ризику на основі CART-моделей [144], COLREG-сумісне планування траєкторії з урахуванням часової невизначеності [145], систематизація AIS-орієнтованих інтелектуальних навігаційних технологій [146], ранні концепції інтелектуальної морської навігації [147], узагальнений підхід області швидкостей [148], сценарно-орієнтоване прогностичне керування [149], імовірнісне уникнення зіткнень [150], нелінійне прогностичне керування суднами з неповним набором керувань [151] та системи навчання для уникнення зіткнень безекіпажних суден у реальному часі [152] формують потужний алгоритмічний базис автоматизованого розходження. Сукупно ці дослідження підтверджують, що сучасна наука вже має розвинений інструментарій для прогнозування колізійної небезпеки, вибору безпечної траєкторії та формування керувальних дій відповідно до навігаційних правил. Водночас значна частина таких рішень залишається зосередженою на алгоритмічній або симуляційній перевірці, часто спирається на обмежені припущення щодо кількості цілей, характеру їх маневрування, стабільності середовища або ролі оператора в остаточному виборі дії. Тому прикладне значення цього напряму полягає не лише у створенні моделей автоматизованого розходження, а й у їх перевірці в замкненому контурі, де алгоритм, навігаційні дані, COLREG-обмеження, траєкторна динаміка, поведінка цілей і режим системної підтримки аналізуються спільно. Саме такий підхід дає змогу перейти від доведення теоретичної працездатності алгоритму до його експериментальної верифікації в умовах, наближених до реального навігаційного середовища.

Необхідно також підкреслити, що важлива частина експериментально-прикладної логіки цього напряму пов’язана з переходом від резервування виконавчих структур до оптимізації суднового руху за прикладними критеріями дрейфу, енерговитрат, швидкодії та точності керування. У цьому контексті праці, присвячені конструктивній оптимізації технічних рішень [153], енергоефективності вітрильно-допоміжних систем [154], програмним сервісам керування надлишковістю [155], міжгалузевій оптимізації надлишкового керування за критеріями потужності й вібрації [156], а також класичним задачам відмовостійкого керування автономними апаратами з надлишковими рушіями [129], формують методичне підґрунтя для розуміння надлишковості не лише як резерву на випадок відмови, а як активного ресурсу підвищення якості автоматизованого керування. Для морського контексту це означає перехід від моделі «надлишковість як запас працездатності» до моделі «надлишковість як ресурс оптимального маневрування», у якій розподіл керувальних впливів може використовуватися для зменшення дрейфу, підвищення енергетичної доцільності, компенсації зовнішніх збурень і забезпечення точності позиціонування. Саме такий підхід є принципово важливим для побудови сучасних автоматизованих систем суднового руху, де маневровість, економічність, стійкість і швидкодія мають оцінюватися не окремо, а як взаємопов’язані критерії керування в реальному або наближеному до реального часу режимі.

Не менш важливий прикладний напрям пов’язаний із використанням ризику як робочого критерію комп’ютерного моделювання, тренажерної перевірки та оцінювання дій щодо усунення зіткнень [157, 158]. У такій постановці поле ризику розглядається не лише як аналітичний індикатор, а як змінна, що може впливати на вибір маршруту, сценарій розходження та оцінювання безпечності керувальних рішень. Тренажерне середовище K-Sim Polaris [157] у цьому контексті є прикладом платформи для оцінювання компетентності навігатора під час виконання дій та аналізу прийнятих рішень у змодельованих навігаційних ситуаціях. Загальні засади комп’ютерного моделювання в MATLAB/Simulink формують методичну основу переходу від

аналітичної моделі до імітаційного експерименту [158]. Водночас для морської галузі принциповим є не лише саме моделювання, а побудова спеціалізованих сценаріїв із багатьма цілями, ризиковими полями, зовнішніми збуреннями та замкненим контуром «модель – судно – середовище – оператор». Саме тому ризик-орієнтовані моделі маршрутоутворення й розходження мають особливу цінність для ІСНЗ, оскільки поєднують математичну постановку, програмну реалізацію, тренажерну перевірку та оцінювання безпечності керувальних дій у єдиній прикладній системі.

Специфічний, але прикладно важливий напрям експериментально-прикладних досліджень формують праці, присвячені автоматизованому керуванню та вибору безпечних режимів руху судна в умовах інтенсивного хвилювання [159–164]. Їхня наукова цінність полягає в тому, що автоматизоване суднове керування розглядається в зоні складних експлуатаційних режимів, де динамічна невизначеність середовища, параметрична хитавиця, резонансні явища та помилки вибору курсу або швидкості безпосередньо впливають на безпеку плавання. Зокрема, технічні рішення щодо автоматичної орієнтації судна відносно хвиль [159], оцінювання безпеки й погодної маршрутизації з урахуванням динаміки крену [160], дослідження параметричного резонансу та його впливу на суднові конструкції й контейнерні судна [161, 162], концепції інтелектуальних бортових систем забезпечення безпеки [163] та підходи до погодної маршрутизації на основі траєкторних даних [164] формують методичну базу для автоматизованого вибору безпечних курсів і швидкостей у складних гідрометеорологічних умовах. Водночас ці підходи здебільшого розв’язують окремі задачі: орієнтацію відносно хвилі, оцінювання небезпечних режимів, опис резонансних зон, підтримку прийняття рішень або маршрутизацію. Тому подальшого розвитку потребує модуль, який поєднує оцінювання параметрів хвилювання і руху судна, виявлення резонансних та нерезонансних областей, розрахунок безпечного курсу й швидкості та перевірку працездатності такого рішення в замкненому контурі. У цьому сенсі автоматизоване керування судном у штормових умовах є важливим прикладом переходу від окремих

моделей безпеки до експериментально перевірюваного контуру підтримки управління рухом судна.

Отже, проаналізований перелік джерел засвідчує, що сучасні дослідження у сфері автоматизованих систем керування та засобів навігаційного забезпечення охоплюють широкий спектр прикладних рішень: керування на основі надлишковості й оптимальний розподіл керувальних впливів, тренажерно-експериментальну перевірку алгоритмів, інтелектуальні модулі уникнення зіткнень, маршрутну оптимізацію за ризиковим критерієм і вибір безпечних режимів руху в складних погодних умовах. Водночас у літературі ці напрями переважно подані роз'єднано: одні роботи зосереджуються на алгоритмічній новизні, інші – на моделюванні ризику або навігаційної інформації, ще інші – на тренажерному, імітаційному чи прикладному підтвердженні. У термінах наукової проблеми це означає, що наявні підходи лише частково послаблюють протиріччя між необхідністю автоматизації керування судном і варіативністю людської поведінки в ергатичній системі, між великими масивами навігаційної інформації та недостатністю засобів її адаптивної обробки, а також між вимогами до безпеки судноплавства й обмеженою інтеграцією інтелектуальних бортових модулів у завершені експериментально перевірені контури керування. Саме тому науково обґрунтованою є постановка завдання побудови автоматизованих систем і засобів навігаційного забезпечення, у яких алгоритмічні моделі, ризик-орієнтовані критерії, дані навігаційних сенсорів, режими підтримки прийняття рішень і механізми керувального втручання розглядаються як взаємопов'язані складові єдиного прикладного контуру ІСНЗ.

1.6. Інформаційно-технологічні засади діагностики та прогнозування кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора

Праці, присвячені аналізу навігаційних аварій і небезпечних ситуацій, створюють важливу емпіричну основу для інформаційно-технологічної діагностики кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора [165]. Їхня методологічна цінність полягає в тому, що помилка судноводіння розглядається не лише як підсумковий факт аварії, а й як результат

попередньої послідовності дій, рішень, просторових відхилень і порушень ситуаційної обізнаності. У такій постановці траєкторія руху судна може інтерпретуватися як цифровий слід операторської діяльності, що відображає точність маневрування, дотримання безпечного сценарію, схильність до ризикових відхилень і своєчасність реагування. Узагальнена статистика навігаційних аварій [165] у цьому контексті виконує роль емпіричного фону, що обґрунтовує необхідність переходу від післяаварійного аналізу до раннього виявлення небезпечних траєкторних проявів. Водночас для завдань ІСНЗ принциповим є подальше перетворення таких цифрових слідів у персоналізовану діагностику оператора за даними AIS/ECDIS, часовими характеристиками маневрування, відхиленнями від експертно-заданого сценарію та ризик-орієнтованими показниками керування.

Особливо важливий напрям формують праці, у яких діагностика поведінкових і когнітивних характеристик оператора пов’язується з аналізом аварійних сценаріїв, психологічною структурою станів, безконтактним вимірюванням фізіологічних параметрів та інформаційною стійкістю ергатичних систем критичного застосування [166–169]. Зокрема, аналітичні підходи до навігаційних небезпек і потенційних аварійних сценаріїв [166] підтверджують, що поведінкові помилки мають просторово-ситуаційний контекст і не виникають ізольовано від навігаційної обстановки; психологічні дослідження багатокомпонентної структури психічних станів обґрунтовують неможливість зведення кваліфікаційно-поведінкового профілю до одного окремого показника [167]; безконтактний моніторинг фізіологічних параметрів [168] демонструє технологічну можливість непрямого оцінювання стану людини-оператора; дослідження стійкості ергатичних систем критичного застосування [169] підтверджують доцільність розроблення спеціалізованих інформаційних засобів підтримки оператора. Сукупно це створює передумови для переходу від загальних психологічних оцінок до інформаційно-технологічної системи, у якій поведінкові, просторові, часові та фізіологічні прояви оператора стають аналітично придатними змінними. Водночас відкритою залишається задача інтеграції таких засобів не лише в

контур діагностики, а й у контур прогнозування поведінкових відхилень та раннього попередження небезпечних режимів діяльності.

Важливий методологічний блок цього напряму становлять праці, у яких приховані поведінкові механізми оператора можуть бути подані через строгі формальні структури – теорію формальних систем, елементи групової симетрії та геометричну теорію груп із використанням графів Келі [170–172]. У такому підході антиципація капітана розглядається не лише як психологічна властивість, а й як простір рішень, що може бути формалізований, пов’язаний зі зміною параметрів руху судна, вибором маневру та відхиленням від безпечного сценарію. Зокрема, теорія формальних систем [170], групові побудови й симетрії [171] та геометрична теорія груп [172] виконують роль не галузевих, а формально-методологічних опор, які дозволяють надати поведінковим проявам оператора структурованої математичної форми. Для ІСНЗ це має принципове значення, оскільки відкриває можливість переходу від опису траєкторії та експертної інтерпретації дій до простору стратегій, у якому антиципація, зміна плану, поведінковий зсув і наближення до небезпечного режиму можуть бути представлені як елементи формальної моделі. Водночас такі побудови потребують подальшого наповнення морськими даними, щоб перейти від абстрактного подання стратегій до багатопараметричних сценаріїв, у яких одночасно враховуються курс, швидкість, навігаційна обстановка, часові характеристики реагування, а також досвід і кваліфікаційно-поведінкові особливості оператора.

Найбільш зрілий рівень інформаційно-технологічного розвитку цього напряму представлено в дослідженнях, у яких поведінкові вибори оператора, фізіологічні й емоційні параметри, просторово-часова організація дії, формальні моделі вибору та алгоритмічні методи аналізу даних розглядаються як основа для діагностики й прогнозування кваліфікаційно-поведінкових характеристик [173–179]. Зокрема, прикладна значущість поведінкових рішень капітана для результату навігаційної діяльності [173], урахування емоційних і фізіологічних параметрів оператора [174, 175], зв’язок планування дії з просторовою організацією сприйняття [176], вплив емоційної модуляції

уваги на часову оцінку [177], а також математичні й алгоритмічні підходи до формалізації вибору, переваг, регресійного та кластерно-регресійного аналізу [178, 179] створюють методичні передумови для побудови простору поведінкових ознак оператора. У сукупності ці джерела дозволяють перейти від опису окремих проявів людського фактора до формалізованого аналізу поведінкових стратегій, антиципації, зміни плану дій і ймовірності небажаних наслідків. Водночас ці підходи ще не утворюють універсальної платформи для всіх навігаційних сценаріїв, оскільки потребують розширення вибірок, підвищення інтерпретованості моделей, урахування ширшого спектра психофізіологічних параметрів і адаптації до різних типів ситуаційної невизначеності.

Таким чином, проаналізований перелік джерел дає змогу констатувати, що сучасні дослідження створили важливі передумови для переходу від загального опису людського фактора до інформаційно-технологічної діагностики та прогнозування кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора. У наявних працях простежуються щонайменше чотири взаємопов’язані напрями: аналіз навігаційних аварій і траєкторних проявів як цифрових слідів операторської діяльності; програмно-апаратні засоби спостереження за увагою, фізіологічними та поведінковими ознаками; формальні моделі прихованих механізмів поведінки, зокрема антиципації, на основі формальних систем, групових структур і графів Келі; алгоритмічні підходи до класифікації та прогнозування поведінкових відхилень [165–179]. Проте ці напрями ще не повністю інтегровані: одні є більш розвиненими в частині діагностики, інші – у формалізації, ще інші – у прогнозуванні. У термінах наукової проблеми це означає, що наявні рішення лише частково послаблюють протиріччя між потребою в точній діагностиці кваліфікаційно-поведінкового рівня оператора та недостатньою формалізацією моделей його поведінки, між великими масивами навігаційної інформації та обмеженістю засобів її адаптивної інтелектуальної обробки, а також між складністю навігаційного середовища й обмеженими когнітивними ресурсами оператора. Саме тому науково обґрунтованою є побудова інтегрованих інформаційно-

технологічних засобів, у яких цифрові навігаційні дані, траєкторні відхилення, часові параметри реакцій, поведінкові патерни, експертні оцінки та інтелектуальні методи аналізу функціонують у межах єдиного контуру оцінювання кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора. Межі такого оцінювання визначаються доступними даними AIS/ECDIS, тренажерними сценаріями, експертною інтерпретацією та можливістю зовнішньої валідації результатів.

Проведений аналіз наукових джерел засвідчив, що сучасний етап розвитку засобів навігаційного забезпечення, автоматизованого керування рухом суден та інтелектуальних навігаційних технологій характеризується істотним розширенням алгоритмічних, інформаційних і технічних можливостей, однак ще не супроводжується достатньо повною адаптацією цих рішень до когнітивних, поведінкових і психофізіологічних особливостей оператора. У наявних дослідженнях ґрунтовно розроблено окремі напрями: людиноцентричне проєктування інтерфейсів, інтелектуальну обробку AIS/ECDIS-даних, алгоритми автоматичного керування та розходження, методи аналізу ризику, моделі уваги, втоми, стресу, антиципації й поведінкових відхилень. Водночас ці результати переважно залишаються роз’єднаними й не утворюють єдиної науково-методологічної системи, придатної для управління ергатичними системами навігаційного забезпечення в умовах реального судноводіння.

Саме ці протиріччя та фрагментарність наявного знання вказують на наукову проблему дослідження, яка полягає в недостатній адаптації наявних систем навігаційного забезпечення та управління рухом суден до когнітивних, психофізіологічних і поведінкових характеристик оператора. Найбільш критично це проявляється в багатофакторному навігаційному середовищі, за складного маневрування, високого інформаційного навантаження та неповного складу навігаційної і ходової вахти. Наслідком є зниження своєчасності й обґрунтованості рішень оператора, відсутність завчасної ідентифікації небезпечних станів, зростання ймовірності помилкових або запізнілих дій, підвищення ризику зіткнень і втрати керованості судна, а також

неповна реалізація потенціалу автоматизації в ергатичному контурі суднового керування.

У такому контексті проведений аналіз літератури підтвердив, що в основі зазначеної проблеми лежить сукупність системних протиріч: між зростаючою складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора; між розвитком автоматизації керування судном і варіативністю поведінки оператора в ергатичній системі; між надходженням великих масивів навігаційної інформації на місток та недостатнім розвитком засобів її адаптивної інтелектуальної обробки для сприйняття оператором; між потребою в точній діагностиці кваліфікаційно-поведінкового рівня оператора та недостатньою формалізацією моделей його дій; між сучасними вимогами до безпеки судноплавства та обмеженою інтеграцією психофізіологічних параметрів оператора в системи підтримки рішень. Отже, виявлені протиріччя мають не локальний, а системний характер і не можуть бути усунуті шляхом удосконалення лише окремих технічних або програмних компонентів.

Установлено, що логіка подальшого дослідження має розгортатися як послідовне розв’язання окресленої наукової проблеми. Початкові розділи формують аналітико-методологічний фундамент, у межах якого обґрунтовується необхідність переходу від техноцентричного підходу до ергатичної моделі навігаційного забезпечення. Отже, інформаційно-технологічні засади діагностики та прогнозування кваліфікаційно-поведінкових характеристик оператора в межах цієї роботи не розглядаються як відокремлений напрям поза загальною архітектурою дослідження. Вони формують методичне підґрунтя для побудови моделей, методів і програмно-аналітичних засобів оцінювання діяльності оператора, а їх прикладна перевірка розгортається в заключному експериментально-верифікаційному розділі дисертації.

1.7. Обґрунтування вибору наукового напряму дослідження

Проведений аналіз дав підстави встановити, що сучасний розвиток навігаційного забезпечення, засобів автоматизованого керування рухом суден, систем інтелектуального аналізу навігаційної інформації та систем підтримки прийняття рішень характеризується розширенням технічних та інформаційних можливостей.

Проте розвиток окремих технічних засобів, інформаційних систем і підходів до підтримки прийняття рішень залишається фрагментарним, якщо не задано чіткого методологічного розмежування процесів різної природи. У межах цієї роботи ергатична система навігаційного забезпечення розглядається як багаторівнева структура, у якій фізико-навігаційні, інформаційно-навігаційні та когнітивно-поведінкові процеси мають різні змінні стану, джерела збурень і критерії оцінювання. Таке розмежування дає змогу уникнути підміни фізичних закономірностей руху судна неповними інформаційними або поведінковими індикаторами оператора.

Фізико-навігаційний контур охоплює траєкторію, курс, швидкість, кутову швидкість повороту, поперечне відхилення від заданого шляху, умови маневрування та зовнішні навігаційні збурення. Інформаційно-навігаційний контур характеризує повноту, достовірність, синхронізованість і своєчасність надходження даних AIS/ECDIS, радіолокаційної інформації та інших джерел інформаційного поля оператора. Когнітивно-поведінковий контур охоплює увагу, когнітивне навантаження, втому, антиципацію, часові реакції, стиль ухвалення рішень і схильність до помилкових або запізнілих дій. Ці характеристики не ототожнюються з параметрами руху судна, а розглядаються як внутрішні змінні операторської діяльності, що можуть проявлятися через часові, поведінкові, навігаційні та інформаційні індикатори.

Інтеграція зазначених рівнів здійснюється через ризик-орієнтований контур, у якому стан судна, стан інформаційного середовища, стан оператора та рівень навігаційного ризику узгоджуються не шляхом механічного змішування різнорідних показників, а через формалізовані зв’язки між відповідними групами ознак. Саме така побудова забезпечує методологічне

розмежування процесів різної природи й водночас дає змогу розглядати їх як взаємопов’язані складові єдиної ергатичної системи навігаційного забезпечення.

Проведений аналіз дозволив встановити, що в основі досліджуваної проблематики лежить не окреме технічне або організаційне ускладнення, а сукупність системних протиріч: між зростаючою складністю навігаційного середовища та обмеженими когнітивними ресурсами оператора; між необхідністю автоматизації керування судном та варіативністю поведінки людини в ергатичній системі; між накопиченням великих масивів даних AIS/ECDIS і недостатнім розвитком засобів їх адаптивної інтерпретації; між потребою в діагностиці стану оператора та недостатньою формалізацією його поведінкових, часових і когнітивних ознак. Зазначені протиріччя мають системний характер, тому їх усунення потребує не лише вдосконалення окремих технічних засобів, а й введення єдиного понятійно-формального опису стану ергатичної системи.

З цією метою в роботі під станом ергатичної системи навігаційного забезпечення доцільно розуміти узагальнений вектор

$$x(t) = \langle x_V(t), x_I(t), x_O(t), x_R(t), m(t) \rangle, \tag{1.1}$$

де $x_V(t)$ – фізико-навігаційний стан судна та навігаційного середовища; $x_I(t)$ – інформаційний стан системи навігаційного забезпечення; $x_O(t)$ – когнітивно-поведінковий і психофізіологічний стан оператора; $x_R(t)$ – ризиковий стан ергатичного контуру; $m(t)$ – поточний режим керування.

Фізико-навігаційний стан $x_V(t)$ охоплює координати судна, курс, швидкість, кутову швидкість повороту, поперечне відхилення від маршруту та параметри зближення з небезпечними об’єктами. Інформаційний стан $x_I(t)$ характеризує якість, повноту, затримку, узгодженість і навантаженість навігаційного інформаційного поля. Стан оператора $x_O(t)$ описує не безпосередньо вимірювану психофізіологічну величину, а сукупність непрямих індикаторів уваги, когнітивного навантаження, часової дисторсії, втоми, антиципації, мотиваційно-поведінкових проявів і схильності до помилкових або запізнілих дій. Ризиковий стан $x_R(t)$ відображає інтегральну

небезпечність, що виникає внаслідок поєднання параметрів руху судна, інформаційної невизначеності, зовнішніх збурень і поточного стану оператора.

Поточний режим керування $m(t)$ не ототожнюється ані зі станом оператора, ані зі станом судна. Він визначає спосіб реалізації керувальних дій у певний момент часу та може відповідати ручному, автоматизованому, консультативному, аварійному або змішаному режиму. Таким чином, у роботі розмежовуються три базові поняття: «стан оператора» описує внутрішні й поведінкові характеристики оператора; «стан ергатичної системи» задає інтегральну конфігурацію судна, інформаційного середовища, оператора, ризику й режиму керування; «режим керування» визначає спосіб реалізації керувальних впливів у поточній навігаційній ситуації.

Для відокремлення спостережуваних, латентних і керувальних компонентів стану введемо вектор спостережень:

$$y(t) = H\left(x(t)\right) + \varepsilon(t), \tag{1.2}$$

де $H(\cdot)$ – оператор відображення стану ергатичної системи у простір доступних вимірювань; $\varepsilon(t)$ – похибка спостереження. До складу $y(t)$ входять ті ознаки, які можуть бути отримані з AIS/ECDIS, радіолокаційних, тренажерних, часових, подієвих або операторських даних.

Вектор керувальних впливів подаємо як:

$$u(t) = \left\langle u_O(t), u_A(t), u_{DSS}(t), u_C(t) \right\rangle, \tag{1.3}$$

де $u_O(t)$ – дії оператора; $u_A(t)$ – автоматизовані керувальні впливи; $u_{DSS}(t)$ – рекомендації системи підтримки прийняття рішень; $u_C(t)$ – коригувальні або аварійні впливи.

Вектор збурень визначимо як:

$$d(t) = \left\langle d_E(t), d_I(t), d_H(t), d_R(t) \right\rangle, \tag{1.4}$$

де $d_E(t)$ – зовнішні навігаційні та гідрометеорологічні збурення; $d_I(t)$ – інформаційні збурення, пов’язані з неповнотою, затримкою або суперечливістю даних; $d_H(t)$ – зміни стану оператора; $d_R(t)$ – регламентні, ситуаційні або організаційні обмеження.

У такому поданні спостережувані змінні описуються через $y(t)$, керувальні впливи – через $u(t)$, зовнішні та внутрішні збурення – через $d(t)$, а латентні характеристики оператора входять до $x_O(t)$ і потребують окремої процедури непрямої ідентифікації.

Саме цим зумовлено вибір теми дисертаційного дослідження: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення».

1.8. Методи дослідження дисертаційної роботи

Як показує аналіз, виконаний у першому розділі, наукова проблема управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора має складний багаторівневий характер. Вона поєднує питання системної організації навігаційного забезпечення, інтелектуальної обробки навігаційної інформації, формалізації когнітивних і психофізіологічних станів оператора, оцінювання ризиків людського фактора, а також інформаційно-технологічної підтримки управління рухом судна. За таких умов її розв’язання вимагає застосування сукупності взаємопов’язаних методів, здатних забезпечити цілісне методологічне обґрунтування дисертаційного дослідження.

Для розв’язання проблеми дисертаційного дослідження використано методи:

Методи системного підходу, які забезпечують розгляд навігаційного забезпечення як багаторівневої ергатичної системи, у межах якої оператор, інформаційне поле, технічні засоби, навігаційне середовище та контури керування утворюють єдину взаємопов’язану структуру. Саме системний підхід дає змогу здійснити коректну декомпозицію головного наукового завдання на незалежні, але змістовно пов’язані складові.

Методи системного аналізу й синтезу використовуються для формування концептуальної моделі ергатичної системи навігаційного забезпечення, виділення спостережуваних і латентних змінних, структуризації інформаційних потоків та опису зв’язків між параметрами руху судна, станом інформаційного поля і діяльністю оператора. При цьому когнітивні, психофізіологічні та

поведінкові характеристики оператора не розглядаються як безпосередньо вимірювані лише за AIS/ECDIS-даними. Траєкторні параметри, мікрокорекції курсу, зміни швидкості, поперечне відхилення від маршруту та часові інтервали між корекціями інтерпретуються як зовнішні операційно-поведінкові прояви, а не як прямі вимірники внутрішнього стану оператора.

Тому в роботі використовується підхід непрямого оцінювання латентного стану оператора за сукупністю навігаційних, часових, поведінкових та інформаційних індикаторів:

$$\hat{x}_O(t) = \Psi(y_{1:t}, u_{1:t}, d_{1:t}, \theta), \tag{1.5}$$

де $\hat{x}_O(t)$ – оцінка латентного стану оператора; $y_{1:t}$ – послідовність доступних спостережень; $u_{1:t}$ – послідовність керувальних дій, операторських реакцій або рекомендацій системи підтримки прийняття рішень; $d_{1:t}$ – послідовність зовнішніх, інформаційних або ситуаційних збурень; θ – параметри моделі; $\Psi(\cdot)$ – оператор непрямого оцінювання. Ідентифікованість таких станів потребує стійкого зв’язку з доступними спостереженнями, а для частини когнітивних і психофізіологічних ознак – зовнішньої валідації за даними eye-tracking, EEG, ЧСС/HRV, тренажерних логів або експертного кодування операторських дій.

Методи дослідження операцій і декомпозиції складних завдань, за допомогою яких здійснюється поділ головного наукового завдання на п’ять головних завдань та десять допоміжних завдань. Це забезпечує побудову технологічної карти дисертації, яка відображає логіку переходу від запитів практики та мети дослідження до наукового результату.

Методи теорії керування, теорії прийняття рішень і теорії ергатичних систем, які використовуються для формалізації контурів управління рухом судна, визначення ролі людського фактора в процесах прийняття рішень, побудови моделей підтримки рішень і розроблення адаптивних механізмів взаємодії між оператором та автоматизованими засобами навігаційного забезпечення.

Методи теорії ймовірностей, математичної статистики, аналізу даних та інтелектуальної обробки інформації, які застосовуються для обробки ІСНЗ-даних, виявлення інформативних ознак траєкторій, виділення поведінкових

індикаторів, формування простору ознак, оцінювання закономірностей змін станів оператора та аналізу ризикових ситуацій.

Методи моделювання когнітивних, поведінкових і психофізіологічних станів, які дозволяють перейти від описового трактування людського фактора до його формалізованого представлення через індикатори уваги, навантаження, стійкості, часової динаміки рішень та характеру навігаційної поведінки.

Методи оцінювання ризиків і адаптивного управління, що забезпечують кількісний і якісний аналіз ризиків людського фактора, визначення умов їх прояву, розроблення процедур попередження критичних ситуацій і корекції рішень у контурі навігаційного забезпечення.

Методи імітаційного, комп'ютерного, тренажерного та експериментально-прикладного моделювання, які використовуються для перевірки працездатності запропонованих моделей, методів і засобів, а також для оцінювання їх ефективності на реальних і модельних навігаційних даних.

Таким чином, методологічне забезпечення дослідження має комплексний характер і охоплює як загальнонаукові методи системного аналізу, так і спеціальні методи моделювання, аналізу даних, керування, діагностики та експериментальної перевірки. Це дає змогу забезпечити наукову коректність постановки задачі, внутрішню узгодженість усіх розділів дисертації та відтворюваність одержаних результатів.

На рисунку 1.6 наведено технологічну карту дисертаційного дослідження, яка відображає логіку методологічного забезпечення роботи.

Карта містить п'ять головних завдань та десять допоміжних завдань.

Сучасними запитами практики є ускладнення навігаційної обстановки, перевантаження навігаційними даними, недостатнє врахування людського фактора, потреба в діагностиці станів оператора та необхідність зниження ризиків у контурах навігаційного забезпечення.

Це формує об'єктивну потребу у створенні нових науково-методологічних засад управління ергатичними системами. Для розв'язання головного наукового завдання дисертації здійснено його декомпозицію на п'ять головних завдань.

Першим головним завданням є визначення методологічних основ і принципів формування концептуальних моделей управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у межах яких оператор, його інформаційне поле, технічні засоби, зовнішнє навігаційне середовище, режими керування та результати судноводіння розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиного функціонального контуру.

Другим головним завданням є розроблення інтелектуальної технології обробки навігаційної інформації та прогнозування дій оператора на основі фрактального, епізодного і ризик-орієнтованого аналізу AIS/ECDIS-траєкторій. Сутність цього завдання полягає у побудові формалізованого програмного конвеєра, який перетворює різноформатні навігаційні дані на уніфікований простір ознак, придатний для виявлення мікрорухів судна, інтерпретації поведінкових проявів оператора, оцінювання епізодного ризику та побудови інтегральних індикаторів нестійкості керування.

Третім головним завданням є дослідження, розвиток і формалізація моделей ідентифікації когнітивних, часових, психофізіологічних і поведінкових станів оператора в процесах управління рухом судна. Виконання цього завдання передбачає побудову теоретико-прикладного апарату, який дає змогу перейти від зовнішньо спостережуваних ознак діяльності оператора до формального опису його внутрішніх станів, особливостей розподілу уваги, часової організації дій, рівня напруження, втоми та поведінкової нестійкості в реальному контурі судноводіння.

Четвертим головним завданням є розроблення моделей, методів і процедур оцінювання та управління ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення. Це завдання орієнтоване на формалізоване виявлення ризиконебезпечних режимів судноводіння, інтеграцію навігаційних даних, індикаторів стану оператора та контексту керування в єдиний аналітичний контур.

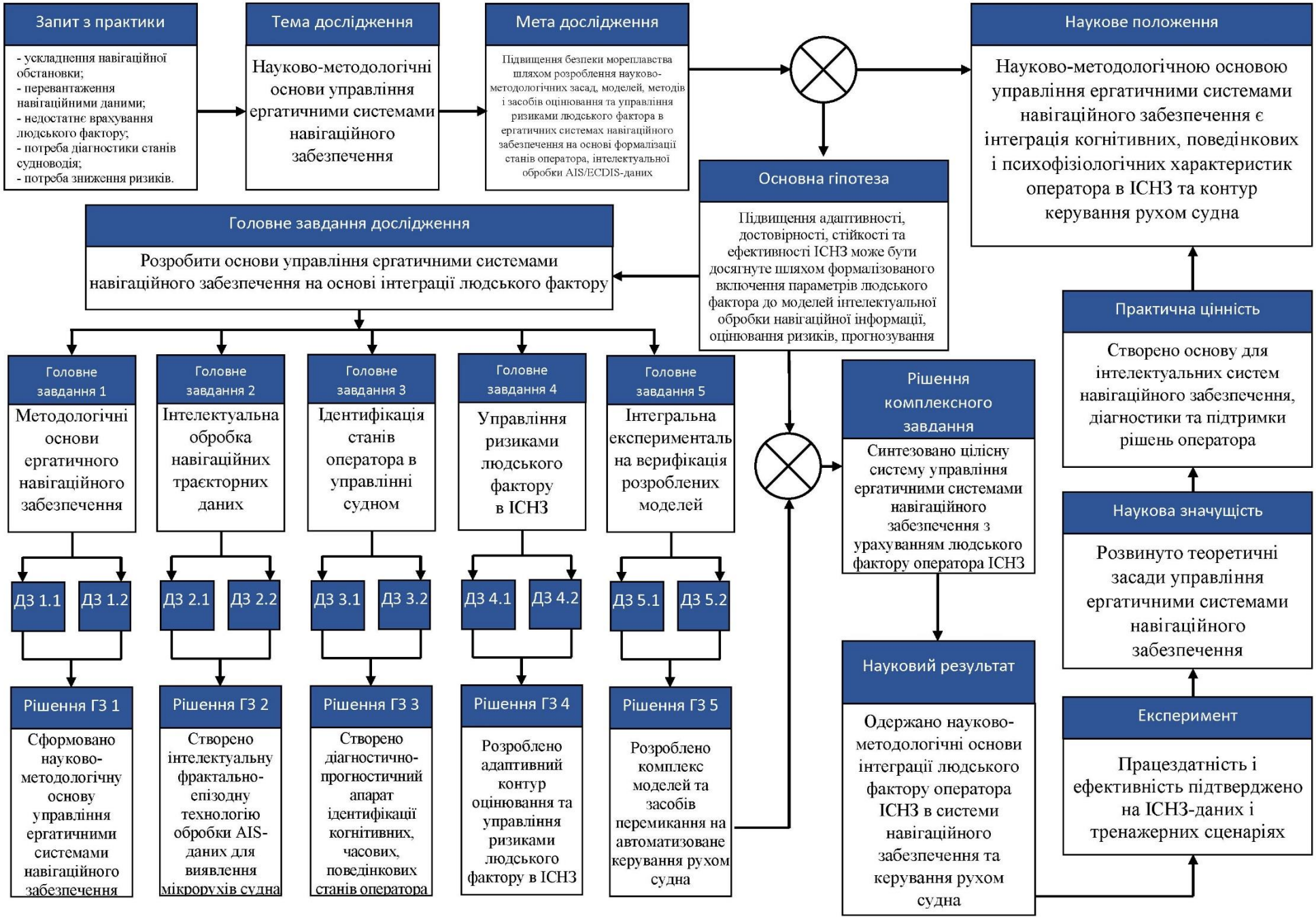


Рисунок 1.6. Технологічна карта дисертаційного дослідження

П’ятим головним завданням є експериментальна верифікація розроблених моделей, методів та програмно-аналітичних засобів управління ІСНЗ, багатоцільового маневрування, ризик-орієнтованої маршрутизації та діагностики діяльності оператора, що становить зміст заключного розділу 6.

Відповідно до зазначеної декомпозиції формується система допоміжних завдань, що деталізує логіку проведення дисертаційного дослідження і забезпечує перехід від загальної концепції до конкретних моделей, методів і прикладних засобів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Допоміжні завдання дисертаційного дослідження

№	ДЗ	Зміст
1	ДЗ 1.1	Розробити концептуально-структурну модель інформаційного поля оператора в ергатичних системах навігаційного забезпечення й управління рухом судна.
2	ДЗ 1.2	Обґрунтувати методологічні принципи стійкості, керованої динаміки, формалізації та уніфікації навігаційних даних ІСНЗ, а також інтеграції когнітивних і психофізіологічних станів оператора в контур управління ергатичною системою.
3	ДЗ 2.1	Розробити процедуру автоматизованого зчитування, нормалізації та метричного подання різноформатних AIS/ECDIS-траєкторій для побудови єдиного простору ознак рейсу.
4	ДЗ 2.2	Сформувати фрактально-епізодний апарат аналізу мікрорухів судна, включаючи систему локальних і глобальних показників, методи виявлення епізодів, фрактального кодування, оцінювання епізодного ризику та побудови інтегральних індикаторів поведінкової нестійкості керування.
5	ДЗ 3.1	Розробити моделі ідентифікації розподілу уваги, дисторсії суб’єктивного часу, ментально-мотиваційних і антиципаційних станів оператора.
6	ДЗ 3.2	Розробити методи непрямої ідентифікації втоми, поведінкових стратегій, критичних ситуацій та прогнозування дій оператора в ергатичних системах управління судном.
7	ДЗ 4.1	Розробити моделі та критерії оцінювання ризиків людського фактора на основі аналізу станів оператора, сприйняття навігаційної ситуації, часових кодів дій і нестійкості керування.
8	ДЗ 4.2	Розробити процедури адаптивного управління ризиками людського фактора, включаючи психодіагностичний супровід, підтримку прийняття рішень і тренінгове формування взаємодії «капітан–лоцман».
9	ДЗ 5.1	Створити моделі, методи та програмно-аналітичні засоби інтеграції траєкторних, операторських і ризик-орієнтованих індикаторів у контур ІСНЗ для підтримки управління рухом судна, багатоцільового та аварійного маневрування, роботи МАІКС, просторово-часової діагностики діяльності оператора та експертної валідації результатів.
10	ДЗ 5.2	Провести експериментально-прикладну перевірку працездатності, ефективності та практичної придатності розроблених засобів на AIS/ECDIS-даних, у тренажерних та прикладних сценаріях управління рухом судна.

Розв’язання зазначених допоміжних завдань забезпечує одержання часткових наукових результатів за кожним із головних завдань. Сукупність зазначених часткових результатів забезпечує рішення комплексного завдання дисертації, яке полягає в синтезі цілісної системи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з урахуванням людського фактора. Саме на цій основі формується інтегрований науковий результат дисертаційної роботи – одержання науково-методологічних основ інтеграції людського фактора в системи навігаційного забезпечення.

Експериментальна перевірка працездатності та ефективності запропонованих моделей, методів і засобів структурно винесена до Розділу 6, де вона виконується на AIS/ECDIS-даних, у тренажерних та прикладних сценаріях управління рухом судна. Наукова значущість одержаних результатів полягає в розвитку теоретичних засад управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, а їх практична цінність полягає у створенні основи для інтелектуальних систем навігаційного забезпечення, діагностики та підтримки рішень.

Таким чином, технологічна карта дисертаційного дослідження виконує роль методологічного каркаса роботи, забезпечуючи логічний зв’язок між метою, гіпотезою, головним науковим завданням, системою головних і допоміжних завдань, частковими результатами, інтегрованим науковим результатом та експериментальною перевіркою.

1.9. Методика проведення дисертаційного дослідження

Методику проведення дисертаційного дослідження подано як послідовність етапів розв’язання головного наукового завдання.

Першим етапом є аналіз сучасного стану проблеми управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, виявлення наявних наукових протиріч, оцінювання запитів практики та обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження. На цьому етапі використовуються методи аналізу наукових джерел, систематизації, порівняння та узагальнення.

Другим етапом є методологічне обґрунтування дослідження і декомпозиція головного наукового завдання на головні та допоміжні завдання. На цьому етапі застосовуються системний підхід, системний аналіз, методи дослідження операцій і структурно-логічне моделювання.

Третім етапом є розроблення концептуально-структурної моделі ергатичної системи навігаційного забезпечення та формалізація взаємодії оператора, інформаційного поля, технічних засобів і зовнішнього навігаційного середовища. На цьому етапі використовуються методи моделювання, аналізу й синтезу, теорії ергатичних систем і теорії керування.

Четвертим етапом є розроблення методів автоматизованого зчитування, нормалізації, синхронізації та ознакового подання ІСНЗ-даних. На цьому етапі застосовуються методи аналізу даних, математичної статистики, цифрової обробки інформації та інтелектуального аналізу навігаційних траєкторій.

П’ятим етапом є розроблення моделей ідентифікації когнітивних, психофізіологічних і поведінкових станів оператора. Тут використовуються методи формалізації станів, побудови індикаторів, статистичного аналізу, класифікації та прогнозування.

Шостим етапом є розроблення моделей оцінювання ризиків людського фактора і процедур їх адаптивного управління в контурі навігаційного забезпечення. Для цього застосовуються методи оцінювання ризику, багатокритеріального аналізу, ситуаційного аналізу та підтримки прийняття рішень.

Сьомим етапом є створення архітектури та інформаційних засобів діагностики, прогнозування та підтримки рішень у судноводінні. На цьому етапі використовуються методи проєктування інтелектуальних систем, моделювання інформаційних процесів та програмної реалізації.

Восьмим етапом є інтегральна експериментально-прикладна перевірка розроблених моделей, методів і засобів на даних ІСНЗ, у тренажерних та прикладних сценаріях управління рухом судна, цей етап розгорнуто у розділі 6 як заключний верифікаційний контур дисертаційного дослідження.

Дев’ятим етапом є узагальнення одержаних результатів, перевірка робочої гіпотези, формулювання часткових та інтегрованих наукових результатів, а також визначення наукової значущості та практичної цінності роботи.

Отже, наведена послідовність етапів визначає логіку проведення дисертаційного дослідження та забезпечує перехід від аналізу проблемної області до розроблення моделей, методів, інформаційно-технологічних засобів і їх експериментальної перевірки.

1.10. Висновки до Розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз наукових публікацій, дотичних до проблеми дослідження, а також здійснено методологічне обґрунтування дослідження з теми дисертації та визначено логіку його подальшого розгортання.

Також було обґрунтовано вибір наукового напряму дослідження, сформульовано тему, мету, об’єкт, предмет, робочу гіпотезу та головне наукове завдання дисертації. Визначено комплекс методів дослідження, побудовано технологічну карту дисертації, здійснено декомпозицію головного наукового завдання на п’ять головних та десять допоміжних завдань, а також встановлено логічний зв’язок між частковими результатами, рішенням комплексного завдання, науковим результатом, експериментальною перевіркою, науковою значущістю, практичною цінністю та основним науковим положенням роботи.

Наведено стислу методику проведення дисертаційного дослідження як послідовність етапів розв’язання поставленої наукової проблеми – від аналітичного обґрунтування теми до експериментальної перевірки одержаних результатів. Отже, перший розділ формує цілісний науковий апарат дисертації та забезпечує обґрунтований перехід до розділів 2–5, у яких розробляються концептуальні моделі, методи та інформаційно-технологічні засоби управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, а також до розділу 6, де здійснюється їх інтегральна експериментальна верифікація.

РОЗДІЛ 2. Методологічні основи розвитку моделей і методів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення

2.1. Концептуально-структурна модель інформаційного поля оператора в ергатичних системах навігаційного забезпечення і управління рухом суден

У сучасних умовах розвитку морського транспорту проблема безпеки судноплавства не може бути адекватно описана в межах спрощеного уявлення про судноводіння як сукупність окремих маневрових дій або як локальну взаємодію оператора з навігаційною апаратурою [1]. За своєю сутністю управління рухом судна є складним поліергатичним людино-машинним процесом із замкненими контурами інформаційної взаємодії, у якому поєднуються об’єкт керування, технічні засоби спостереження і навігації, засоби зовнішнього навігаційного забезпечення, канали інформаційної взаємодії, нормативно-процедурні обмеження, а також когнітивні характеристики, часові параметри дій, поведінкові прояви та функціональний стан оператора [51, 252]. Саме такий підхід відповідає предметному полю спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом», яке охоплює дослідження закономірностей процесів навігації та управління рухом, формування й використання фізичних та інформаційних полів, структурний аналіз і синтез динамічних та ергатичних систем навігаційного забезпечення, а також дослідження інформаційних потоків і діяльності операторів [3, 51, 91].

У зв’язку з цим визначальним об’єктом аналізу постає не окремий навігаційний параметр і навіть не автономний технічний засіб, а інформаційне поле оператора як цілісне інтегративне середовище, в межах якого здійснюються сприйняття, селекція, зіставлення, інтерпретація та операційне використання навігаційно значущих відомостей. Інакше кажучи, реальна ефективність системи управління рухом визначається не лише точністю сенсорів або наявністю каналів зв’язку, а й якістю організації інформаційного простору, в якому оператор формує ситуаційну обізнаність [4, 52], виконує оцінювання небезпеки, співвідносить поточний стан із нормативними

вимогами та реалізує керувальні впливи на судно. За таких умов людський фактор перестає бути лише пояснювальною категорією аварійності й набуває статусу формалізованого системного чинника [3], що підлягає моделюванню, ідентифікації, прогнозуванню та функціональній компенсації [2, 253].

Особливої ваги ця постановка набуває в обмежених і складних районах плавання, де інформаційне навантаження на оператора є багатоканальним, різнорідним і часово критичним [5]. У вузькостях, портових акваторіях, зонах інтенсивного суднопотоку, за обмеженої видимості, під впливом гідрометеорологічних збурень і регламентних обмежень оператор функціонує в умовах, коли одночасно співіснують сигнали від суднових навігаційних систем, повідомлення від VTS, лоцманських і диспетчерських служб, дані AIS, ECDIS, РЛС, GNSS, візуальні спостереження, процедурні вимоги COLREG, вимоги судноплавної компанії та місцеві правила організації руху, а також лоції. За такої багатоджерельної природи навігаційної обстановки вирішальним стає не сам факт надходження інформації, а її структурна узгодженість, часова актуальність, логічна несуперечливість, достовірність і семантична придатність для прийняття рішення [91–93].

Отже, інформаційне поле оператора (рис. 2.1) доцільно визначати як багаторівневу функціонально впорядковану сукупність навігаційних, комунікаційних, процедурних, просторово-часових і ризик-орієнтованих даних, яка забезпечує формування ситуаційної моделі середовища, оцінювання стану судна та навколишньої обстановки, вибір режиму керування та контроль результатів реалізованих дій. У такому визначенні інформаційне поле виступає не фоном діяльності оператора, а безпосереднім середовищем формування та реалізації керувальних дій [1, 55]. Саме через нього поєднуються зовнішній контур навігаційного забезпечення, внутрішній контур бортового інформаційного забезпечення і операторський контур прийняття рішень [91]. Такий підхід узгоджується з напрямами спеціальності, де безпосередньо виділено формування інформаційних полів для навігації, комплексну обробку інформації, методи підвищення точності й надійності

даних про параметри руху, а також дослідження циркуляції інформаційних потоків у системах навігаційного забезпечення та управління рухом.

З методологічного погляду запропонована концептуально-структурна модель повинна будуватися як ієрархічна схема взаємодії щонайменше п’яти взаємозалежних контурів: зовнішнього середовища та навігаційного забезпечення; інформаційного поля оператора; операторського контуру; контуру режимів керування рухом; контуру оцінювання результатів і корекції рішень. Така структуризація є принципово важливою, оскільки дає змогу перейти від описового переліку інформаційних джерел до формального подання причинно-наслідкових зв’язків між навігаційною ситуацією, інформаційним навантаженням, когнітивною реакцією оператора, вибором способу керування та фактичними параметрами безпеки руху [56]. Перший контур моделі охоплює зовнішнє середовище та систему навігаційного забезпечення, у межах яких задаються граничні умови функціонування всієї ергатичної системи. До нього входять: геометрія району плавання, конфігурація фарватерів і обмежених просторів, гідрометеорологічний стан, наявність і динаміка інших об’єктів, режими розподілу руху, організаційні та нормативні регламенти, канали диспетчерського й лоцманського супроводу [65]. Саме цей контур генерує первинні збурення, обмеження та вимоги, які трансформуються у відповідні інформаційні потоки й впливають на параметри діяльності оператора. Це відповідає завданням ситуаційного аналізу стану середовища, розроблення методів організації функціонування систем навігаційного забезпечення та підвищення їхньої точності, цілісності, надійності й експлуатаційної готовності [50]. Центральним елементом моделі є інформаційне поле оператора. Його принципова особливість полягає в тому, що воно формується не механічною сумою повідомлень від технічних засобів, а шляхом функціональної інтеграції кількох взаємопов’язаних підпросторів [58].

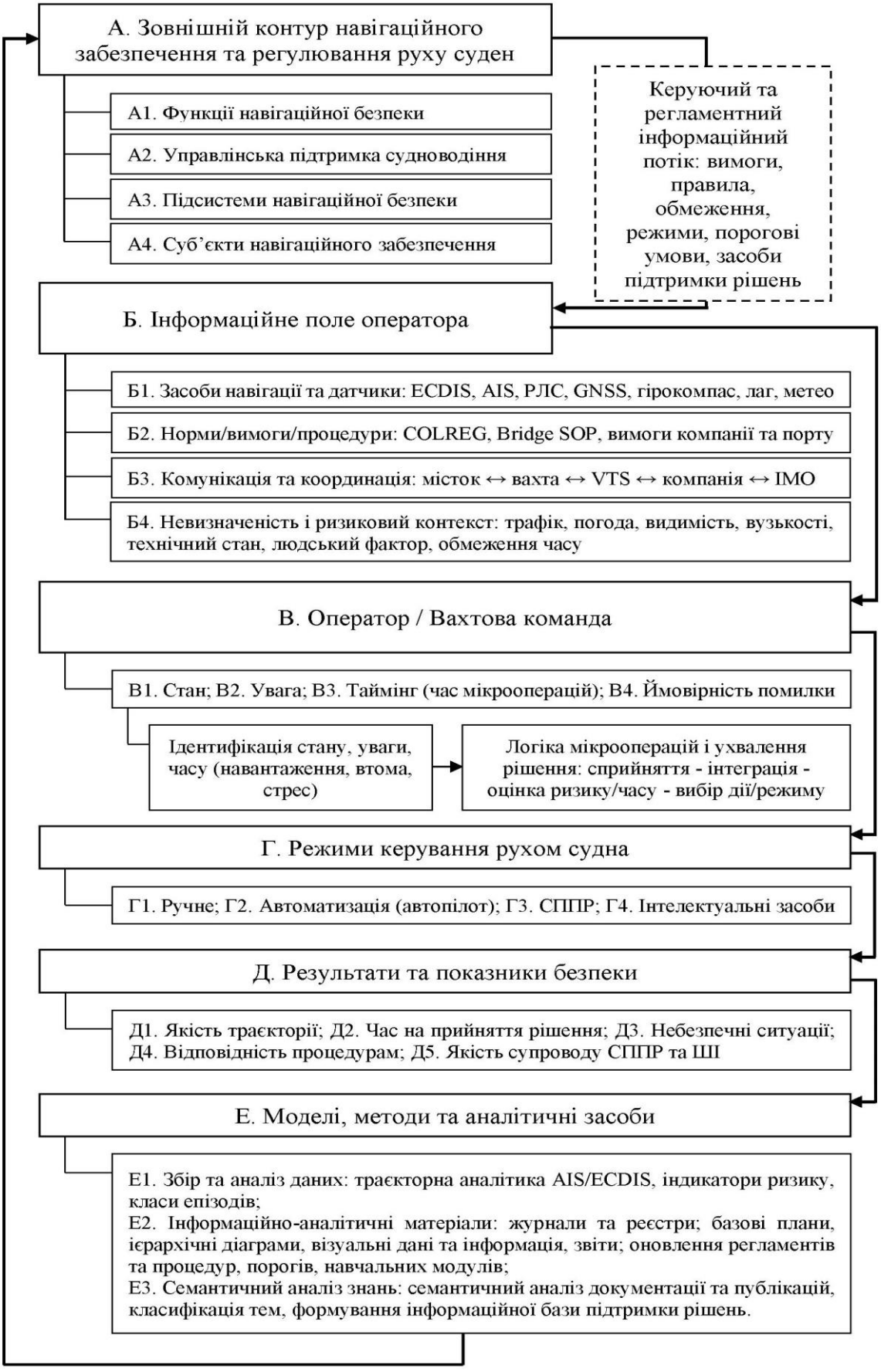


Рисунок 2.1. Модель інформаційного поля оператора

Інструментально-вимірювальний підпростір забезпечує дані про координати, курс, швидкість, параметри зближення, гідрометеорологічні умови, стан навігаційних приладів і динаміку маневру [92]. Просторово-обстановочний підпростір репрезентує взаємне розташування цілей, конфігурацію акваторії, обмеження прохідності та потенційні конфлікти траєкторій [93]. Нормативно-процедурний підпростір визначає правила судноплавства, службові процедури, інструкції компаній та правила локального регулювання [72]. Комунікаційно-координаційний підпростір відображає інформаційний обмін між містком, вахтою, VTS, лоцманом і суміжними учасниками руху [5, 87]. Ризик-сценарний підпростір інтегрує ознаки небезпечного зближення, часовий дефіцит, невизначеність, суперечність даних, порушення своєчасності реагування та інші предиктори розвитку критичної ситуації [64].

Унаслідок такого структурування інформаційне поле набуває властивостей динамічного навігаційного середовища, яке має власні параметри якості: повноту, достовірність, узгодженість, часову релевантність, інформативність, доступність для оператора та ступінь придатності до аналітичної інтерпретації [52, 91, 93]. Відповідно, ефективність управління рухом має оцінюватися не лише за кінцевою траєкторією судна, а й за якістю організації цього поля, оскільки помилки судноводіння часто виникають не через повну відсутність даних, а через їх запізнення, фрагментарність, надлишковість, семантичну неоднозначність або неможливість своєчасно перетворити інформацію на керувальну дію [210]. Подальший контур становить операторський блок, у якому оператор та вахтова команда розглядаються як активні функціональні елементи ергатичної системи. У межах цієї моделі оператор не зводиться до ролі пасивного інтерпретатора приладової інформації, а постає як адаптивний суб’єкт, стан якого безпосередньо впливає на структуру й результат управління рухом [4, 85]. До системно значущих характеристик цього блоку належать рівень ситуаційної обізнаності [54], характеристики зорової уваги та її розподілу [111, 199, 266], дисторсія суб’єктивного сприйняття часу [73–77, 208], антиципаційні

характеристики оператора [203, 212], рівень утоми [100, 124, 206] і стресу [125], а також імовірність помилкових дій оператора в морських операціях [61, 62, 113]. З урахуванням цього аспекту одна й та сама навігаційна ситуація може зумовлювати різні рішення, траєкторії та рівень безпеки залежно від стану, рівня підготовленості та характеру дій оператора [128].

У цьому контексті функціональна логіка дій оператора в межах інформаційного поля може бути представлена як впорядкований ланцюг мікрооперацій: сприйняття навігаційних сигналів та ознак руху суден-цілей; інтегрування різноформатної інформації в єдину ситуаційну модель; індивідуальне оцінювання ризику, наявного часу та допустимих альтернатив; вибір послідовності дій; формування основної керувальної команди; реалізація маневру; контроль можливих наслідків і коригування рішення в динаміці. Така формалізація забезпечує основу для опису рішень і поведінкових проявів оператора за траєкторними ознаками [247, 262, 271], а також для непрямого оцінювання його функціонального стану за часовими, психофізіологічними та поведінковими індикаторами [190, 206, 208, 235, 292]. Це також повністю узгоджується з положеннями паспорта спеціальності, де окремо виділено дослідження закономірностей діяльності операторів, математичне моделювання поведінки та методи керування морським транспортним засобом за екстремальних умов.

Четвертий контур моделі утворюють режими керування рухом судна, які доцільно інтерпретувати як ієрархію рівнів розподілу функцій між людиною, автоматизованими підсистемами та інтелектуальними засобами підтримки. У цій ієрархії можуть бути виділені щонайменше режими прямого ручного керування, стабілізаційного автоматичного керування, керування з підтримкою прийняття рішень і керування з використанням інтелектуальних аналітичних модулів. Принципово важливо, що вибір режиму не повинен мати характеру суто технічної опції; він є функцією стану інформаційного поля, ступеня небезпеки ситуації, темпоральних резервів, якості зовнішнього супроводу, функціонального стану оператора та поточної конфігурації ризику. Відтак режим керування має визначатися формалізованими правилами

переходу, в яких порогові значення ризику, невизначеності та часової напруженості поєднані з показниками надійності дій оператора [115].

П’ятий контур моделі становить блок оцінювання результатів, виявлення відхилень і зворотного впливу на систему, через який замкнено цикл управління. У ньому фіксуються параметри фактичної траєкторії, точність її проходження, часові витрати на прийняття рішень, частота та клас небезпечних зближень [110], відповідність нормативним процедурам, стійкість роботи засобів підтримки та інтегральний рівень навігаційного ризику. Цей блок має двояке призначення. По-перше, він забезпечує оперативне коригування дій у режимі реального часу. По-друге, він формує аналітичну основу для подальшого вдосконалення моделей, критеріїв, процедур і конфігурації засобів навігаційного забезпечення. Саме в цьому місці інформаційне поле перестає бути лише середовищем поточної навігації та перетворюється на джерело даних для виявлення закономірностей функціонування ергатичної системи [235].

Окремо слід виокремити блок моделей, методів і інформаційно-аналітичних засобів, який забезпечує перехід від первинних навігаційних даних до формалізованих оцінок, індикаторів, класифікацій і рішень. У межах цього блоку реалізуються методи обробки сигналів, комплексної інтеграції даних, траєкторного аналізу даних ІСНЗ, розпізнавання небезпечних епізодів, оцінювання рівнів ризику, виявлення аномалій судноводіння, прогнозування розвитку ситуації та формування рекомендацій щодо зміни режиму керування. З огляду на це, стає можливим концептуальне перетворення інформаційного поля оператора із сукупності різнорідних даних у структуровану форму організаційного знання, яка є придатною до застосування в контурах підтримки прийняття рішень [10, 20, 296]. Така постановка охоплює комплексну обробку даних для підвищення точності й надійності визначення параметрів руху судна [191, 200], а також пошук безпечних та оптимізованих траєкторій руху морських транспортних засобів [120, 238]. Таким чином, запропонована концептуально-структурна модель інформаційного поля оператора є базовою теоретико-методологічною основою дослідження, у

межах якого інтегруються інформаційні потоки, операторські стани, режими керування, параметри навігаційного середовища, критерії безпеки та методи інтелектуальної обробки даних. Її призначення полягає у створенні системної основи для подальшого розроблення моделей стійкості, процедур формалізації ІСНЗ-даних, методів оцінювання стану оператора та експериментальної перевірки цих результатів у заключному розділі роботи.

2.2. Аналого-індикаторна модель стійкості та керованої динаміки ергатичних систем навігаційного забезпечення на основі гравітаційно-інерціальної інтерпретації

Безпека мореплавства в сучасних умовах повинна розглядатися не як сукупність окремих порушень, інцидентів або помилок оператора, а як властивість функціонування складної ергатичної системи [169], у якій взаємодіють судно, засоби навігації, засоби зовнішнього навігаційного забезпечення, інформаційне поле оператора, регламентні обмеження, зовнішнє середовище та людський фактор. За такої постановки визначальним є не лише факт відхилення від безпечного режиму, а здатність системи зберігати стійкість функціонування, компенсувати дію збурень і утримувати керованість у змінній навігаційній ситуації [192, 169, 252, 293].

Відповідно до положень, обґрунтованих у першому розділі, людський фактор доцільно розглядати не як зовнішнє обмеження для технічної системи, а як внутрішній функціональний компонент ергатичного контуру управління [127], від якого безпосередньо залежать повнота сприйняття навігаційної ситуації, якість оцінювання небезпеки, своєчасність реакцій і вибір керувальних дій. У зв’язку з цим стійкість систем навігаційного забезпечення повинна досліджуватися не лише через технічну надійність окремих засобів, а через інтегральну здатність усієї системи зберігати цільовий безпечний режим функціонування за наявності зовнішніх і внутрішніх збурень [170].

Разом із тим, у задачах навігаційного забезпечення та управління рухом суден недостатньо формалізованими залишаються питання інтегральної стійкості ергатичних систем, меж збереження керованості, допустимих

діапазонів відхилення від цільового режиму та умов переходу [141, 213, 234, 237]. Особливої ваги розв’язання цих питань набуває в умовах високого інформаційного навантаження, ускладнення навігаційної обстановки, часових обмежень, підвищеної інтенсивності руху та зростання ролі людино-машинної взаємодії в контурі управління. За таких умов необхідною є модель, яка дає змогу розглядати систему навігаційного забезпечення не фрагментарно, а як єдину динамічну структуру зі своїм простором станів, збурень, обмежень і керувальних впливів.

У зв’язку з цим виникає потреба в концептуальній системі індикаторів, яка дає змогу узгоджено подати параметри руху судна, режими функціонування засобів навігаційного забезпечення, інформаційне поле оператора, характеристики навігаційної ситуації, прояви людського фактора та зовнішні нормативні впливи в єдиному просторі станів [169, 252, 293], збурень і можливих реакцій системи. Така рамка використовується для попереднього формалізованого оцінювання рівня навігаційного ризику, встановлення меж допустимих відхилень і визначення потреби в коригувальних заходах [172]. Саме тому подальший перехід здійснюється не до строгої фізичної моделі, а до аналого-індикаторного подання, у якому безпека судноплавства розглядається через індикатори збереження або втрати стійкого режиму функціонування.

Методологічно доцільним у цій задачі є використання гравітаційно-інерціальної інтерпретації як аналого-індикаторного способу подання стійкості ергатичної системи. У запропонованій аналого-індикаторній моделі стійкість розглядається не як механічна властивість, а як результат поєднання цільового безпечного режиму та індикаторного запасу здатності системи зберігати цей режим під дією зовнішніх і внутрішніх збурень [293]. Загальний ризик-орієнтований контекст такого подання відповідає напрямам досліджень [141, 142, 166]. У такій постановці стає можливим виділити опорний режим функціонування, запас стійкості, допустимі межі відхилення, інтенсивність збурювальних впливів, а також умови, за яких система переходить до нестійкого або небезпечного режиму. Гравітаційно-інерціальна інтерпретація

використовується в роботі як аналого-індикаторний спосіб формалізації стійкості, збурень і керованої реконфігурації ІСНЗ. Її параметри є нормованими функціональними індикаторами та не ототожнюються з фізичними силами, моментами або механічною динамікою судна.

Для забезпечення внутрішньої логіки підрозділу запропонований підхід розглядається на трьох рівнях, пов'язаних між собою, але мають різний статус. Перший рівень є концептуально-аналоговим і задає мову опису стійкості через опорний режим безпеки, відхилення, запас стійкого функціонування та потребу в коригувальних діях. Другий рівень є експертно-параметричним і використовується для попереднього оцінювання внеску функціональних сегментів $P_1 \ldots P_8$ у відповідні індикатори моделі. Третій рівень є сценарно-розрахунковим і має демонстраційний характер, оскільки показує, як за прийнятих експертних припущень можуть формуватися попередні рекомендації щодо зміни рівнів підтримки окремих сегментів.

У цьому підрозділі гравітаційно-інерціальна інтерпретація використовується не як пряме перенесення законів механіки на ергатичну систему навігаційного забезпечення, а як аналого-індикаторна схема опису її стійкості, керованості та чутливості до збурень. Відповідно, поняття вертикальної осі, інерції, нормативної «гравітації», прецесії та імпульсу моменту розглядаються як умовні індикатори функціонального стану системи, а не як фізичні величини у класичному механічному сенсі.

У межах запропонованої аналого-індикаторної моделі вертикальна вісь відповідає цільовому режиму безпечного функціонування ергатичної системи навігаційного забезпечення. Вертикальну вісь доцільно інтерпретувати як опорний вектор навігаційної безпеки, зміст якого формують вимоги міжнародних конвенцій, правила судноводіння, нормативні вимоги до функціонування засобів навігаційного забезпечення, кількісні показники ризику та умови безпечного руху судна [66].

Відхилення цієї осі від вертикального положення відображає відхилення системи від експертно-заданого режиму навігаційної безпеки. У практичному вимірі це може проявлятися у зростанні ризику, порушенні узгодженості

інформаційних потоків, погіршенні якості взаємодії між елементами системи, перевантаженні оператора, збільшенні кількості критичних ситуацій або зниженні надійності управління рухом судна.

Індикатор ω_3, аналогом якого є кутова швидкість обертання, характеризує операційний ритм функціонування системи навігаційного забезпечення, тобто узгоджену інтенсивність циркуляції інформації, ухвалення рішень, виконання процедур, надання технічної підтримки та реагування на зміни в навігаційній ситуації. У цьому контексті поздовжній момент інерції доцільно трактувати як запас структурної та функціональної стійкості ергатичної системи, що визначається надійністю технічних засобів, узгодженістю процедур, готовністю служб навігаційного забезпечення, стабільністю інформаційної взаємодії, підготовленістю персоналу та рівнем сформованості професійних навичок оператора. Саме ця інерційна складова зумовлює здатність системи утримувати цільовий режим функціонування без різких зривів, хаотичних перебудов і втрати керованості [174].

Зовнішній момент збурювальних впливів у моделі відображає сукупну дію факторів, що порушують стійкий режим функціонування системи. До них належать зміни навігаційної ситуації, інтенсивність руху, гідрометеорологічні умови, інформаційне перевантаження, технічні відмови, організаційні неузгодженості, дефіцит часу, а також прояви людського фактора. У цій постановці людський фактор розглядається не лише як джерело випадкової помилки, а й як внутрішній динамічний чинник, що змінює характер реакції системи на однакові зовнішні впливи [166]. Це має принципове значення для ергатичних систем, оскільки за однакової складності навігаційної ситуації наслідки збурення можуть істотно відрізнятися залежно від стану оператора, розподілу уваги, рівня ситуаційної обізнаності, часової напруженості та ступеня психофізіологічного навантаження.

Прецесія в межах моделі відображає частоту та інтенсивність вимушених коригувань режиму функціонування системи [326]. У прикладному розумінні це проявляється у збільшенні кількості переходів між режимами керування, зростанні частоти ручних втручань, посиленні потреби в зовнішній

координації, необхідності повторного коригування прийнятих рішень, збільшенні кількості попереджень, коригуванні параметрів маршруту руху судна та процедурних дій. Якщо така прецесія набуває систематичного характеру, це свідчить про зменшення запасу стійкості та підвищення чутливості системи до збурень. Інакше кажучи, система ще зберігає керованість, однак її функціонування вже переходить у режим напруженої компенсації відхилень.

Гравітаційна складова моделі подається як нормативно-регламентне поле, сформоване міжнародними конвенціями, правилами COLREG, стандартами безпеки, національними регламентами, експлуатаційними процедурами та вимогами до функціонування засобів навігаційного забезпечення. У запропонованій моделі нормативно-регламентне поле виконує функцію коригувального орієнтира, що визначає напрям повернення системи до меж допустимого режиму функціонування [293]. Доцільність застосування випереджувальних індикаторів для виявлення наближення до небезпечного режиму обґрунтовується у праці [122].

Окремим елементом моделі є дисипативні втрати, під якими слід розуміти поступове виснаження ресурсу стійкого функціонування системи під дією затримок інформації, неузгодженості процедур, надмірної складності комунікації, технічних збоїв, накопичення втоми, перевантаження оператора, зростання невизначеності та погіршення якості рішень. На відміну від разових збурень, дисипативні втрати мають накопичувальний характер і систематично зменшують здатність ергатичної системи до самокомпенсації відхилень. Саме тому їх своєчасне виявлення та зниження слід розглядати як одне з центральних завдань управління навігаційною безпекою [123].

Таким чином, запропонована гравітаційно-інерціальна інтерпретація дає змогу формально описати функціональні відповідності між цільовим режимом навігаційної безпеки, запасом стійкості ергатичної системи, зовнішніми і внутрішніми збурювальними впливами, частотою коригувальних дій та межами допустимого функціонування [127].

З урахуванням наведених положень далі доцільно побудувати систему змінних і параметрів, що відображають стан ергатичної системи та засобів навігаційного забезпечення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Паспорт змінних аналого-індикаторної моделі стійкості ергатичної системи навігаційного забезпечення

Змінна	Зміст у моделі	Статус змінної	Шкала / одиниця	Джерело або спосіб оцінювання
θ	Відхилення системи від експертно-заданого режиму безпеки	латентна інтегральна змінна	градуси або радіани	розрахунок за сукупністю показників ризику, неузгодженості, відхилення траєкторії та операторського навантаження
$G(t)$	Нормативно-ситуаційний тиск на систему	агрегований індикатор	[0;1]	нормування регламентних, ситуаційних і зовнішніх чинників
$R_r(t)$	Інтенсивність регуляторного або контрольного режиму	експертно-розрахункова змінна	[0;1]	експертне оцінювання, нормативні вимоги, частота перевірок, рівень процедурної жорсткості
$Q_q(t)$	Ситуаційний чинник середовища	вимірювана або експертно-розрахункова змінна	[0;1]	трафік, видимість, гідрометеорологічні умови, технічний стан, геополітичний ризик
$I_З$	Структурно-функціональна зрілість системи	латентний інтегральний індикатор	[0;1]	експертна матриця ваг, оцінка готовності процедур, засобів і персоналу
$\omega_З$	Операційний ритм функціонування системи	розрахунково-експертний індикатор	[0;1]	темп обробки інформації, цикли прийняття рішень, частота оновлення даних
$L = I_З\omega_З$	Індикатор запасу стійкого функціонування	похідна розрахункова змінна	[0;1]	добуток нормованих індикаторів $I_З$ та $\omega_З$
τ_N	Нормативно-коригувальна напруженість	похідна розрахункова змінна	безрозмірний індекс	обчислюється через G(t), θ та коефіцієнт чутливості
Ω	Частота потреби у коригувальних діях	похідна розрахункова змінна	безрозмірний індекс	$\Omega = \tau/L$, використовується для порівняння сценаріїв

Аналогії, наведені в табл. 2.1, де підібрано так, щоб кожен індикатор відображав окрему функціональну характеристику ергатичної системи навігаційного забезпечення та управління рухом. Вертикальна вісь дзиґи

відповідає експертно-заданого режиму навігаційної безпеки, оскільки саме відносно цього напряму оцінюються всі допустимі та критичні відхилення. Індикатор ω_3, асоційований з операційним ритмом, відображає операційний ритм функціонування системи, адже саме інтенсивність і впорядкованість циклів обробки інформації, прийняття рішень і реалізації керувальних впливів формують стабільний інерційний ефект. Поздовжній момент інерції I_3 інтерпретується як структурно-функціональна зрілість системи, що характеризує рівень технічної, інформаційної, організаційно-процедурної та операторської готовності ергатичної системи навігаційного забезпечення до підтримання цільового режиму безпеки, компенсації збурень і збереження керованості. Гравітаційний момент τ_N відображає коригувальний вплив нормативно-інформаційного поля, який активізується у разі відхилення від експертно-заданої осі навігаційної безпеки. У такий спосіб аналого-індикаторна структура моделі дає змогу формально інтерпретувати основні режими функціонування систем навігаційного забезпечення і контурів управління рухом суден через показники відхилення, стійкості, нормативного впливу та потреби в коригувальних діях.

Для подальшої формалізації введемо нормований індикатор нормативно-ситуаційного впливу, який характеризує сукупний тиск регламентних, інформаційних і зовнішніх умов на ергатичну систему навігаційного забезпечення. Цей індикатор характеризує узагальнений нормативно-ситуаційний вплив на відхилення системи від режиму безпеки.

Умовний вектор нормативної «гравітації» задається як:

$$g_N(t) = G(t)e_z, \tag{2.1}$$

де $G(t)$ – нормований інтегральний індикатор нормативно-ситуаційного впливу; e_z – одиничний вектор експертно-заданого напряму безпечного функціонування системи.

Інтегральний індикатор $G(t)$ подаємо у вигляді:

$$G(t) = k_g\left(\sum_{r\in R} w_r R_r(t) + \sum_{q\in Q} v_q Q_q(t)\right) \tag{2.2}$$

$$R_r(t), Q_q(t) \in [0;1],\ w_r \geq 0,\ v_q \geq 0,$$
$$\sum_{r \in R} w_r + \sum_{q \in Q} v_q = 1, \tag{2.3}$$

де:

$R_r(t)$ – нормовані індикатори регуляторних і контрольних режимів;

$Q_q(t)$ – нормовані індикатори ситуаційних чинників;

w_r, v_q – вагові коефіцієнти;

k_g – масштабний коефіцієнт індикаторної моделі.

Для забезпечення сумісності всі складові зводяться до шкали [0;1], а вагові коефіцієнти обираються невід'ємними та нормованими. Тому $G(t)$ є інтегральним індексом нормативно-ситуаційного впливу, сформованим у єдиному нормованому просторі показників. Значення $R_r(t)$ та $Q_q(t)$ можуть формуватися на основі вимірюваних, нормативно заданих або експертно оцінених показників, після чого їх переводять в єдиний індикаторний простір.

Тоді нормативно-коригувальну напруженість визначимо співвідношенням:

$$\tau_N(\theta, t) = \kappa_\tau G(t) \sin\theta, \tag{2.4}$$

де $\kappa_\tau > 0$ – коефіцієнт чутливості системи до нормативно-ситуаційного впливу.

На відміну від класичної механічної моделі, у даному випадку параметри маси та плеча сили не вводяться, оскільки вони не мають безпосереднього фізичного змісту в ергатичній системі навігаційного забезпечення. Їх роль виконує узагальнений коефіцієнт чутливості k_τ, який у демонстраційних розрахунках може прийматися рівним одиниці або задаватися експертно, а в подальших прикладних дослідженнях калібруватися за тренажерними, експлуатаційними або експертними даними. Тому величина $\tau_N(\theta, t)$ є не фізичним моментом сили, а індикатором коригувальної напруженості, що зростає за збільшення відхилення системи від експертно-заданого режиму безпеки.

Для оцінювання потреби системи у коригувальних перебудовах введено безрозмірний індикатор $\Omega_{\text{сист}}$, який характеризує частоту та інтенсивність

переходів між режимами керування, повторних корекцій, додаткових операторських втручань і зовнішньої координації. У першому наближенні його визначено залежністю:

$$\Omega_{сист} \approx \frac{\tau_{\text{сист}}}{I_{\text{З,сист}} \cdot \omega_{\text{З,сист}}}. \tag{2.5}$$

Співвідношення (2.5) слід розглядати як введене індикаторне правило оцінювання частоти коригувальних перебудов. Його зміст полягає в тому, що зі зростанням сумарної збурювальної напруженості $\tau_{сист}$ система потребує частіших корекцій, тоді як збільшення структурно-функціональної зрілості $I_{З,сист}$ та стабільності операційного ритму $\omega_{З,сист}$ зменшує потребу в таких корекціях. Отже, $\Omega_{сист}$ є безрозмірним індикатором інтенсивності керованої реконфігурації системи.

Звідси випливає прямий організаційно-функціональний висновок: щоб запобігти коливальному режиму та надмірній частоті коригувальних перебудов системи, необхідно підсилювати структурно-функціональну зрілість $I_{З,сист}$ і підтримувати сталий операційний ритм $\omega_{\text{З,сист}}$, одночасно зменшуючи зовнішній і внутрішній збурювальний момент $\tau_{сист}$. На практиці це передбачає запобігання ризикам і врахування організаційно-людських причин аварій [84, 116], уніфікацію процедур та інформаційного обміну [169, 252], а також підвищення надійності технічних засобів і контролю навігаційних даних [191, 200].

Далі виконаємо агрегування на рівні взаємодіючих підсистем.

Для множини узгоджених підсистем $i = 1,\ldots,N$:

$$L_{\text{сист}} = \sum_i L_i,\ \tau_{\text{сист}} = \sum_i \tau_i,\ \frac{dL_{\text{сист}}}{dt} = \tau_{сист}. \tag{2.6}$$

За умови належного узгодження орієнтацій опорних осей підсистем:

$$L_{\text{сист}} \approx \left(\sum_i I_{3,i}\right)\omega_{\text{З,сист}},\ \Omega_{\text{сист}} \approx \frac{\sum_i \tau_i}{\left(\sum_i I_{3,i}\right)\omega_{\text{З,сист}}}, \tag{2.7}$$

Для відмежування стійкого, прикордонного та нестійкого режимів функціонування введемо умовний критерій збереження керованості:

$$L_{сист} \geq L_{crit},$$

де $L_{сист} = I_{З,сист}\omega_{З,сист}$ – індикатор запасу стійкого функціонування системи; L_{crit} – критичний поріг, нижче якого система втрачає здатність компенсувати збурення без переходу до режиму частих неузгоджених перебудов, зростання операторського навантаження та підвищення ризику помилкових рішень.

Індикаторний і прикладний зміст цього критерію полягає в тому, що для збереження керованості ергатична система повинна мати мінімально достатній запас стійкого функціонування $L_{сист}$. Цей запас формується поєднанням структурно-функціональної зрілості системи $I_{сист}$ та стабільності її операційного ритму $\omega_З$. Якщо $L_{сист} < L_{crit}$, система переходить у прикордонний або нестійкий режим, що проявляється у збільшенні частоти корекцій, втраті узгодженості між підсистемами, зростанні навантаження на оператора та підвищенні ймовірності помилки.

Далі сформулюємо задачу керованої індикаторної динаміки. Для подальшого опису керованої динаміки необхідно розмежувати змінні різних часових масштабів. До швидких змінних належать кут відхилення від експертно-заданого режиму $\theta(t)$, операційний ритм функціонування $\omega_З(t)$, збурювальна напруженість $\tau(t)$ та індикатор частоти коригувальних перебудов $\Omega(t)$. Вони можуть змінюватися в межах окремого навігаційного епізоду, циклу вахтового контролю або локального режиму маневрування.

Отже, на основі фізичної аналогії сформовано концептуальну індикаторну схему опису стійкості, збурень і потреби у коригувальних діях в ергатичній системі навігаційного забезпечення та управління рухом суден. Схематичне подання аналогових впливів, змінних і функціональних елементів моделі наведено на рис. 2.2.

У межах запропонованої моделі завдання забезпечення навігаційної безпеки подаються як узгоджена система дій, спрямована на підтримання стійкого режиму функціонування. Основними напрямами є узгодження функціональних контурів відносно осі навігаційної безпеки, зменшення відхилення θ, підвищення жорсткості міжсистемних зв’язків $I_{\perp}$, нарощування

структурно-функціональної зрілості $I_З$ та стабілізація операційного ритму $\omega_З$. Розподіл ресурсів здійснюється між впливами $u_І$ і u_ω з метою мінімізації частоти коригувальних перебудов Ω за умови $L \geq L_{кр}$. Керувальний вплив $u_І$ характеризується спрямованим підвищенням структурно-функціональної зрілості системи $I_З$ шляхом удосконалення технічного, інформаційного, процедурного та кадрового забезпечення. У свою чергу, керувальний вплив u_ω відображає заходи зі стабілізації операційного ритму $\omega_З$, зокрема синхронізацію інформаційних потоків, процедур прийняття рішень і реагування на зміни навігаційної ситуації.

Управління ризиками спрямоване на зменшення збурювального моменту τ шляхом раннього виявлення відхилень, уніфікації процедур і підвищення узгодженості інформаційного обміну. Контур забезпечення якості орієнтований на зниження інформаційних, часових та організаційних втрат шляхом усунення дублювань, автоматизації процедур і цільового контролю ефективності. За зростання зовнішніх збурень система переходить до керованої реконфігурації режимів без критичного зниження $I_З$, ритму $\omega_З$ та запасу стійкості.

Для формалізації впливу окремих сегментів системи P_1–P_8 на ці параметри вводиться експертна матриця ваг, що відображає їхню відносну важливість для підтримання ритму, зрілості та стійкості системи в умовах збурень (табл. 2.2–2.4). Матриці впливу мають статус попередньої експертної апроксимації. Вони не розглядаються як об’єктивно виміряні фізичні коефіцієнти, а використовуються для демонстрації процедури переходу від якісного опису функціональних сегментів ергатичної системи до нормованої індикаторної матриці впливу. Надалі ці коефіцієнти можуть уточнюватися за результатами тренажерних експериментів, аналізу даних AIS/ECDIS, матеріалів розслідування навігаційних інцидентів, звітів класифікаційних товариств, даних VTS, портових журналів та експлуатаційної статистики. Під час формування критеріїв експертного оцінювання враховано статистичні та аналітичні матеріали EMSA [165].

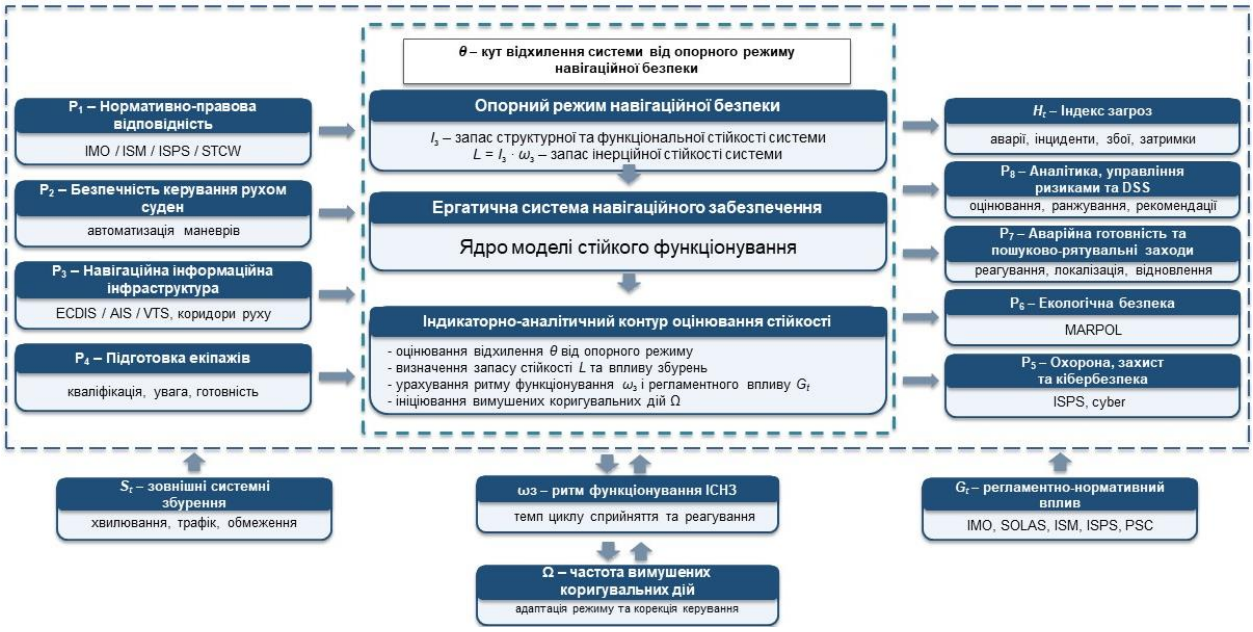


Рисунок 2.2. Аналого-індикаторна модель стійкості та керованої динаміки ергатичної системи навігаційного забезпечення

Таблиця 2.2. Вплив сегментів системи P_1–P_8 на параметри ω_3 та I_3 (0 – мінімальний; 3 – ключовий)

Функціональні компоненти ергатичної системи навігаційного забезпечення	Внесок у ω_3	Внесок у I_3
P_1. Нормативно-правова відповідність	1	3
P_2. Безпечність керування рухом суден; автоматизація розходження і маневрування	2	2
P_3. Навігаційна інформаційна інфраструктура (ECDIS/AIS/VTS)	2	1
P_4. Підготовка екіпажів	1	3
P_5. Охорона, захист і кібербезпека	1	2
P_6. Екологічна безпека	1	1
P_7. Аварійна готовність та SAR	1	2
P_8. Аналітика, управління ризиками та СППР	2	3

Другий блок параметрів моделі відображає взаємодію ергатичної системи навігаційного забезпечення із зовнішнім середовищем та сукупністю джерел ризику, що описується індексами загроз H_t, нормативної «гравітації» G_t, соціально-геополітичних ризиків S_t та зведеного моменту збурень τ. Ці змінні характеризують інтенсивність впливу зовнішніх чинників – інцидентів, регуляторних вимог, санкційних режимів і геополітичних подій на стан системи, її ритм, прецесію та режим функціонування. Експертне оцінювання внеску

сегментів P_1–P_8 у зазначені індекси дає змогу визначити ті контури, через які зовнішні збурення найсильніше впливають на внутрішню динаміку системи.

Таблиця 2.3. Вплив сегментів системи P_1–P_8 на параметри H_t, G_t, S_t, τ

Функціональні компоненти ергатичної системи навігаційного забезпечення	Внесок у H_t	Внесок у G_t	Внесок у S_t	Внесок у τ
P_1. Нормативно-правова відповідність	1	3	1	2
P_2. Безпечність керування рухом суден; автоматизація розходження і маневрування	3	1	0	2
P_3. Навігаційна інформаційна інфраструктура (ECDIS/AIS/VTS)	3	1	0	2
P_4. Підготовка екіпажів	2	1	0	2
P_5. Охорона, захист і кібербезпека	2	2	2	3
P_6. Екологічна безпека	2	2	1	3
P_7. Аварійна готовність та SAR	2	1	1	1,5
P_8. Аналітика, управління ризиками та СППР	1,5	1,5	1,5	2

Слід зазначити, що кут θ у моделі розглядається як інтегральний показник відхилення системи від експертно-заданого режиму навігаційної безпеки. На відміну від локальних показників, θ відображає сукупний результат структурних, операційних, інформаційних і людських збоїв у різних сегментах. Тому доцільно окремо подати таблицю, яка фіксує не лише вагу впливу кожного сегмента на θ, а й характер цього впливу.

Таблиця 2.4. Вплив сегментів ергатичної системи на кутове відхилення θ

Функціональні компоненти ергатичної системи навігаційного забезпечення	Вплив на θ	Коротка характеристика впливу
P_1. Нормативно-правова відповідність	2	Системні порушення вимог IMO/ISM/ISPS/STCW поступово відхиляють систему від цільового режиму безпеки та надійності.

Продовження таблиці 2.4.

P_2. Безпечність керування рухом суден; автоматизація розходження і маневрування	2	Небезпечні маневри, порушення COLREG і недостатня автоматизація розходження безпосередньо підвищують відхилення від безпечного режиму судноводіння.
P_3. Навігаційна інформаційна інфраструктура (ECDIS/AIS/VTS)	2	Дефіцит або низька якість навігаційної інформації призводять до траєкторних рішень, що не відповідають заданим межам безпеки.
P_4. Підготовка екіпажів	2	Нестача компетентності, втома та типові помилки оператора системно зміщують функціонування системи від експертно-заданого режиму.
P_5. Охорона, захист і кібербезпека	1	Інциденти охорони та кібербезпеки переважно спричиняють епізодичні різкі відхилення режиму функціонування.
P_6. Екологічна безпека	2	Недотримання екологічних вимог формує стале відхилення від нормативно визначеного режиму безпечної та екологічно відповідальної експлуатації, МАРПОЛ.
P_7. Аварійна готовність та SAR	1	Аварійна готовність і SAR більше впливають на масштаб наслідків відхилень, ніж на їх первинне виникнення.
P_8. Аналітика, управління ризиками та СППР	3	Аналітика, управління ризиками та СППР забезпечують виявлення, візуалізацію і кероване зменшення відхилення θ.

Для ілюстрації функціонування запропонованої аналого-індикаторної моделі наведено сценарний розрахунок за шістьма умовними станами ергатичної системи (табл. 2.6). Його призначення полягає у демонстрації переходу від експертно заданих параметрів до індикаторів стійкості, напруженості та потреби в коригувальних діях.

У межах цього підрозділу експертне оцінювання використовується як метод параметризації аналого-індикаторної моделі стійкості ергатичної системи навігаційного забезпечення. Тому подальше застосування коефіцієнта конкордації Кендалла має на меті перевірку внутрішньої узгодженості експертних суджень, на основі яких формуються відповідні матриці впливу. Для побудови матриць ваг впливу виконано процедуру експертного опитування [21], за участю $m = 6$ експертів, які оцінювали $n = 8$ сегментів P_1 – P_8 із використанням дискретної шкали $s_{q,i}^{(e)} \in \{0,1,2,3\}$, де q позначає параметр моделі (ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ), i – індекс сегмента, а e – індекс експерта.

Агреговані ваги для кожного параметра обчислювалися шляхом усереднення та нормалізації:

$$\bar{s}_{q,i} = \frac{1}{m}\sum_{e=1}^{m} s_{q,i}^{(e)},\ a_{q,i} = \frac{\bar{s}_{q,i}}{\sum_{j=1}^{n} \bar{s}_{q,j}}, \tag{2.8}$$

де $a_{q,i}$ – нормалізований внесок сегмента P_i у параметр q.

Узгодженість оцінок експертів пропонується оцінювати шляхом перетворення оцінок на ранги та обчислення коефіцієнта конкордації Кендалла W_q окремо для кожного параметра q. Для кожного експерта e-оцінки $\left\{s_{q,i}^{(e)}\right\}_{i=1}^{n}$, перетворюються на ранги $r_{q,i}^{(e)}$, (вища оцінка відповідає вищому пріоритету). За наявності зв'язку застосовуються середні ранги: якщо група зв'язаних значень розміру t займає позиції $k,...,k+t-1$, то кожному елементу призначається:

$$r = \frac{k + \left(k + t - 1\right)}{2}. \tag{2.9}$$

Далі обчислюються агреговані ранги та їх розсіювання:

$$R_{q,i} = \sum_{e=1}^{m} r_{q,i}^{(e)},\ \bar{R}_q = m \cdot \frac{n+1}{2},\ S_q = \sum_{i=1}^{n}\left(R_{q,i} - \bar{R}_q\right)^2. \tag{2.10}$$

Тоді коефіцієнт Кендалла з поправкою на зв'язки має вигляд:

$$W_q = \frac{12 S_q}{m^2\left(n^3 - n\right) - m T_q},\ T_q = \sum_{e=1}^{m}\sum_{g=1}^{G_e}\left(t_{e,g}^3 - t_{e,g}\right), \tag{2.11}$$

де $t_{e,g}$ – розмір g-ї групи зв'язаних значень у ранжуванні експерта e, а G_e – кількість таких груп. Статистичну значущість коефіцієнта конкордації можна перевірити за наближенням:

$$\chi_q^2 = m\left(n-1\right)W_q,\ df = n - 1. \tag{2.12}$$

Для коректного застосування коефіцієнта конкордації Кендалла W_q первинною основою мають бути індивідуальні оцінки кожного експерта за кожним параметром моделі та за відповідними сегментами $P_1 - P_8$. Узагальнені значення, наведені в табл. 2.2–2.4, відображають агрегований результат експертного оцінювання і використовуються як нормована матриця впливу.

Подальше уточнення експертно заданих матриць впливу та перевірка їх прикладної придатності можуть виконуватися шляхом зіставлення з тренажерними сценаріями, AIS/ECDIS-даними, VTS/VDR-журналами та результатами експериментальної верифікації, наведеної в розділі 6.

Далі проводиться чисельний аналіз для усіх сценаріїв. Для цього пропонується формальна розрахункова модель, побудована на даних, наведених у табл. 2.5 та якісних вагових коефіцієнтів впливу для сегментів $P_1 \ldots P_8$. Спочатку формалізуємо рівень сегментів P_i. Введемо рівень активності для кожного сегмента $p_i \in [0,3]$, $i = 1,...,8$, де 0 відповідає практично нерозвиненому або неактивному сегменту, а 3 – максимально розвиненому сегменту з найвищим пріоритетом, p_i є кількісним поданням рівня розвитку або активності сегмента. Після нормалізації одержуємо масштабовані значення $\tilde{p}_i = \frac{p_i}{3} \in [0,1]$.

Далі формуємо матрицю впливу за табличними даними та вектор стану моделі. Сценарії, наведені в табл. 2.5, мають умовно-експертний характер і використовуються для демонстрації роботи запропонованої індикаторної процедури. Значення параметрів ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ, L_t, Ω подано у нормованому вигляді й сформовано так, щоб відобразити типові класи ситуацій: стабільний режим, посилення нормативного тиску, операційну кризу, зовнішній шок, програму покращення та збалансований режим.

Таблиця 2.5. Зведені дані сценарного розрахунку за умовними станами ергатичної системи

Сценарій	I_3	ω_3	H_t	G_t	S_t	θ	τ	L_t	Ω	Статус
1. Базовий стабільний	0,70	1,00	0,30	0,40	0,20	15	0,32	0,70	0,46	базовий сценарій
2. Посилення нормативних вимог	0,70	1,00	0,30	0,70	0,20	18	0,44	0,70	0,63	сценарій нормативного тиску
3. Операційна криза	0,60	0,80	0,80	0,70	0,30	40	0,66	0,48	1.38	сценарій операційного порушення

Продовження таблиці 2.5.

4.Геополітичний шок	0,70	0,60	0,60	0,60	0,90	45	0,66	0,42	1.57	сценарій зовнішнього збурення
5. Програма покращення	0,75	0,90	0,40	0,60	0,40	25	0,48	0,675	0,71	сценарій коригувального впливу
6. Новий збалансований режим	0,85	1,0	0,20	0,50	0,30	10	0,34	0,935	0,4	цільовий сценарій

Дані з табл. 2.2–2.4 подано у вигляді нормалізованих ваг a_{ki}, отриманих діленням кожної ваги на суму ваг усіх сегментів для відповідного параметра:

$$a_{ki} = \frac{w_i^k}{\sum_{j=1}^{8} w_j^k},\ k \in \{\omega, I, H, G, S, \theta, \tau\}. \tag{2.13}$$

У такий спосіб отримуємо матрицю впливу, яка пов’язує рівні розвитку сегментів $P_1 \ldots P_8$ з макропараметрами моделі:

$$A = \begin{bmatrix} a_{\omega 1} & \ldots & a_{\omega 8} \\ a_{I1} & \ldots & a_{I8} \\ a_{H1} & \ldots & a_{H8} \\ a_{G1} & \ldots & a_{G8} \\ a_{S1} & \ldots & a_{S8} \\ a_{\theta 1} & \ldots & a_{\theta 8} \\ a_{\tau 1} & \ldots & a_{\tau 8} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{7\times 8}. \tag{2.14}$$

Для демонстраційного сценарного розрахунку використаємо спрощену лінійну апроксимацію першого порядку, яка пов’язує рівні розвитку сегментів $P_1 \ldots P_8$ із макропараметрами моделі. Ця залежність не замінює динамічну модель і не доводить реального лінійного характеру взаємодії всіх параметрів системи. Вона застосовується як розрахунковий інструмент для попереднього перетворення експертно заданих рівнів сегментів у нормовані зміни індикаторів стану.

Тоді у спрощеному сценарному наближенні можна записати:

$$x = x_{\min} + D \cdot Ap,$$

Де $p = [p_1, \ldots, p_8]^T$ – вектор рівнів сегментів (нормований до [0,1]),

$x_{\min}$ – вектор мінімально допустимих значень параметрів, $D = \mathrm{diag}\left(d_\omega, d_I, d_H, d_G, d_S, d_\theta, d_\tau\right)$ – діагональна матриця амплітуд параметрів, тобто максимальний діапазон, на який кожен параметр може змінюватися при варіюванні всіх рівнів сегментів від $p_i = 0$ до $p_i = 1$.

У практичному застосуванні модель відображає поточний сценарій стану системи у векторі рекомендованих змін рівнів сегментів $P_1 \ldots P_8$. Вхідними даними моделі є поточний вектор макропараметрів $x^{(s)} = \left[\omega_3, I_3, H_t, G_t, S_t, \theta, \tau\right]^T$ для сценарію s та відповідного цільового стану x^*, який відображає бажаний рівень стійкості (вище L, нижче Ω, менші ризики). Параметри моделі включають матрицю впливу B і матрицю пріоритетів W, які один раз калібруються за експертними оцінками та надалі вважаються сталими. Виходами моделі є неперервний вектор коригувань $\Delta p^{(s)}$ та дискретизовані значення $\Delta P_i \in \{-2, \ldots, 2\}$, які задають, наскільки кожен сегмент P_i слід посилити або, навпаки, послабити. Отже, система явно розділяє сталі структурні параметри, сценарно-залежні входи та вихідні управлінські рішення, які можуть бути безпосередньо інтерпретовані особами, відповідальними за управління навігаційною безпекою та розподіл ресурсів.

Тому для параметрів ризику (H_t, G_t, S_t, θ, τ) доцільно ввести від'ємний знак:

$$x_k = x_k^{\mathrm{ref}} - d_k \sum_i a_{ki} p_i, \; k \in \{H, G, S, \theta, \tau\}, \tag{2.15}$$

де x_k^{ref} – базовий рівень ризик-орієнтованого параметра за відсутності коригувального впливу.

Отримана матриця A у (2.14) акумулює ці коефіцієнти та пов'язує рівні розвитку сегментів P_1–P_8 з макропараметрами моделі. Далі рівняння (2.15) узгоджує знак для ризик-орієнтованих параметрів так, щоб посилення релевантних сегментів відповідало зменшенню H_t, G_t, S_t, θ та τ.

Отже, знак впливу не є автоматично виведеним з даних, а задається експертно на основі змістовної інтерпретації параметрів. Для цього можна ввести діагональну матрицю орієнтації: S_{or} = diag(+1,+1,–1,–1,–1,–1,–1), де

додатні знаки відповідають параметрам, які бажано збільшувати, а від'ємні – параметрам, які бажано зменшувати. У векторній формі цю властивість можна записати як $x = b + Bp$, де B містить додатні знаки для ω_3, I_3 та від'ємні для H_t, G_t, S_t, θ, τ.

У такому підході, якщо розглянути, наприклад, шість сценаріїв із різними конфігураціями параметрів ергатичної системи:

– поточний вектор стану $x^{(s)}$,

– бажаний (референтний) стан x^*,

то задача формулюється як $x^* - x^s = B\Delta p^s$,

де $\Delta p^{(s)}$ – рекомендовані зміни рівнів сегментів для сценарію s.

Оскільки система є недовизначеною – сім параметрів для восьми коригованих сегментів і може містити суперечливі вимоги до зміни окремих сегментів, логічно сформулювати зважену задачу найменших квадратів із пріоритетами:

$$\min_{\Delta p^{(s)}} \left\| W\left(B\Delta p^{(s)} - \Delta x^{(s)}\right)\right\|_2^2,\ \Delta x^{(s)} = x^* - x^{(s)},\ -p_i^{(s)} \le \Delta p_i^{(s)} \le 1 - p_i^{(s)},\ i = 1,...,8 \quad (2.16)$$

Тут матриця пріоритетів параметрів має вигляд:

$$W = \mathrm{diag}(w_\omega, w_I, w_H, w_G, w_S, w_\theta, w_\tau).$$

Задача (2.16) задає пошук вектора змін $\Delta p^{(s)}$, який мінімізує зважену невідповідність між бажаним зсувом параметрів $\Delta x^{(s)}$ та зсувом, який породжують коригування сегментів $B\Delta p^{(s)}$, з урахуванням допустимих меж зміни рівня кожного сегмента.

Розв'язок задачі (2.16) дає змогу отримати рекомендовані зміни сегментів $P_1 \ldots P_8$, які є найкращими в сенсі обраного зваженого квадратичного критерію. Проте такий розв'язок не підтверджує емпіричної валідації самої матриці B; він лише показує, які зміни сегментів узгоджені з прийнятою експертно-сценарною структурою моделі.

Якщо задача (2.16) розглядається без активних обмежень, а матриця $B^T W^T W B$ є невиродженою, її розв'язок може бути поданий у замкненій формі:

$$\Delta p^{(s)} = \left(B^T W^T B W\right)^{-1} B^T W^T W \Delta x^{(s)}. \quad (2.17)$$

Далі задаємо порогові рівні інтенсивності коригування. Для практичного рішення $\Delta p^{(s)}$ доцільно перейти до дискретних рівнів інтенсивності. Для цього вводимо нормалізовану величину зміни для кожного сегмента: $r_i^{(s)} = \left|\Delta p_i^{(s)}\right|$.

Далі задаємо порогові рівні для різних сценаріїв:

$0 \le r_i^{(s)} < 0.1$ «підтримувати поточний рівень», якщо $\Delta P_i = 0$;

$0.1 \le r_i^{(s)} < 0.2$ «помірно посилити або послабити», якщо $\Delta P_i = \pm 1 level$;

$r_i^{(s)} \ge 0.2$ «суттєво посилити або послабити», якщо $\Delta P_i = \pm 2 level$.

Знак $\Delta p_i^{(s)}$ визначає режим коригування:

– посилити сегмент (якщо $\Delta p_i^{(s)} > 0$);

– від’ємне значення $\Delta p_i^{(s)} < 0$ не означає зниження рівня безпеки, а інтерпретується як можливість зменшення надлишкової процедурної складності, усунення дублювання дій або перерозподілу ресурсів за умови збереження мінімально допустимого рівня функціонування.

Для кожного сценарію s алгоритм передбачає такі операції: задання поточного стану $x^{(s)}$; визначення цільового стану x^*; вибір матриці пріоритетів $W^{(s)}$; розв’язання задачі найменших квадратів відносно $\Delta p^{(s)}$; класифікацію отриманих значень за дискретними рівнями рекомендацій для кожного P_i.

Під час коригувальних дій необхідно враховувати L і поріг стійкості. Окремо контролюється виконання умови $L = I_3 \omega_3$, L_{crit} – заданий критичний поріг.

Після визначення $\Delta p^{(s)}$ через формули для ω_3 та I_3 отримуємо:

$$\omega_3^{new} = \omega_3^{(s)} + \Delta\omega_3^{(s)},\ I_3^{new} = I_3^{(s)} + \Delta I_3^{(s)},\ L^{new} = I_3^{new} \cdot \omega_3^{new}. \qquad (2.18)$$

Співвідношення (2.17) відображають перехід від рекомендованих змін сегментів $\Delta p^{(s)}$ до оновлених значень операційного ритму, структурно-функціональної зрілості та запасу стійкого функціонування. Отримане значення L^{new} порівнюють із критичним порогом L_{crit}. Якщо $L^{new} \ge L_{crit}$, запропонований набір коригувань вважається достатнім для переведення системи у стійкий або умовно стійкий режим. Якщо ж $L^{new} < L_{crit}$, набір $\Delta p^{(s)}$ є

недостатнім; у такому випадку необхідно переглянути цільові значення ω_3 та I_3, змінити допустимі межі коригування сегментів або безпосередньо включити обмеження $L^{new} \geq L_{crit}$ до задачі сценарної оптимізації.

Подальший сценарний розрахунок має ілюстративний характер і призначений для перевірки того, як зміна вхідних індикаторів впливає на запас стійкого функціонування L, індикатор коригувальних перебудов Ω та профіль рекомендованих змін сегментів $P_1 \ldots P_8$.

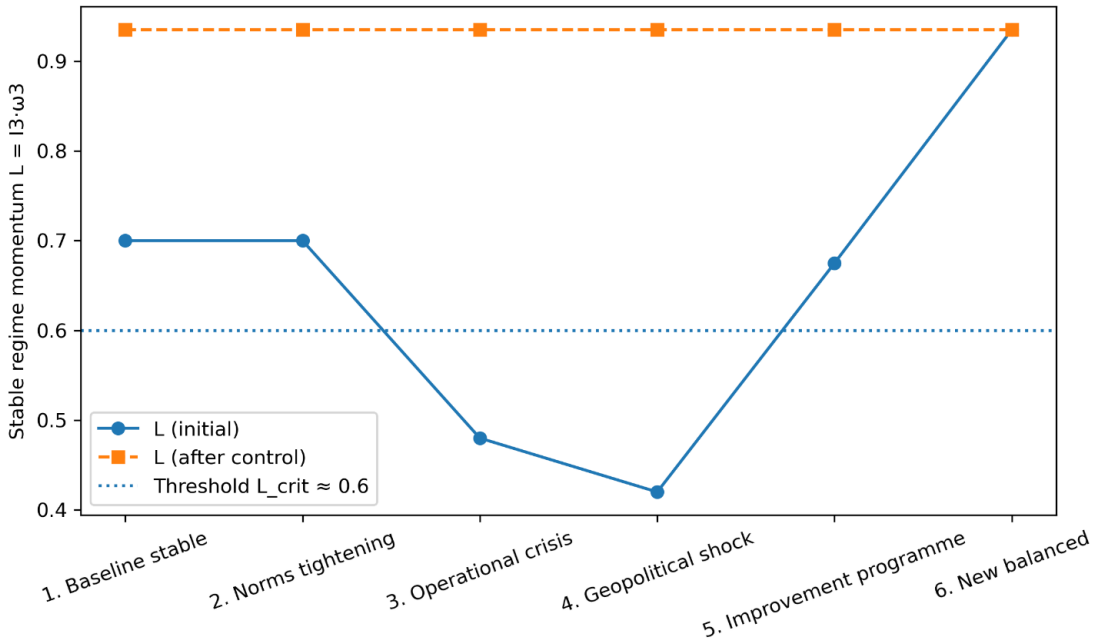


Рисунок 2.3. Графік індикатора запасу стійкого функціонування L

Рисунки 2.3–2.5 візуалізують динаміку моделі для шести сценаріїв, наведених у табл. 2.5. Для кожного сценарію «початкова» точка відповідає некерованому стану $x^{(s)}$, тоді як точка «після керування» отримується шляхом застосування рекомендованих змін ΔP_i та повторного обчислення L і Ω. Таким чином, траєкторії на графіках наочно демонструють, як процедура оптимізації змінює індикатор запасу стійкого функціонування L, частоту прецесії та конфігурацію рівнів сегментів у множині сценаріїв.

Індикатор запасу стійкого функціонування L показує, що в початковому стані сценарії 3 («Операційна криза») та 4 («Геополітичний шок») мають значення L нижчі за поріг $L_{кр} \approx 0{,}6$, тоді як сценарій 5 розташований поблизу цієї межі, що відповідає нестійким або прикордонним режимам. Після застосування керування для всіх шести сценаріїв отримано однакове значення

$L_{new} \approx 0{,}935$, який істотно перевищує порогове значення; тобто за прийнятих припущень і заданого референтного стану модель демонструє можливість переведення сценарію до умовно стійкого збалансованого режиму.

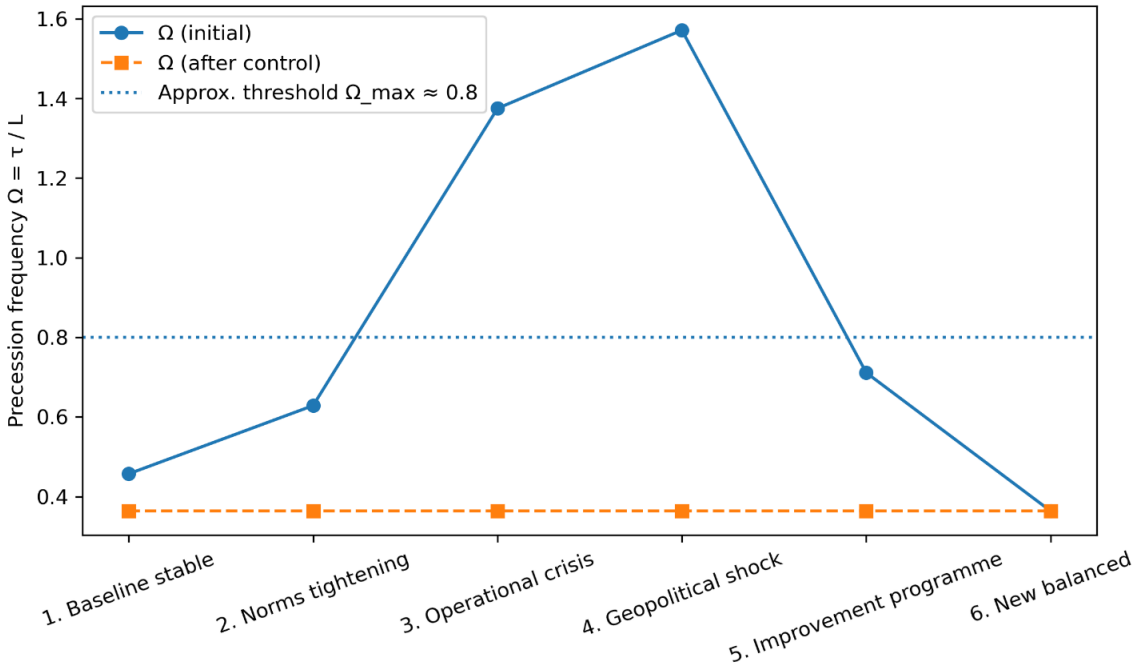


Рисунок 2.4. Графік індикатора частоти коригувальних перебудов Ω

Графік індикатора частоти коригувальних перебудов (прецесії) $\Omega = \tau / L$ показує, що до застосування керування сценарії 3 і 4 суттєво перевищують рекомендований поріг $\Omega_{max} \approx 0{,}8$ (індикатор частоти коригувальних перебудов перевищує 1.3–1.5), тоді як сценарій 5 наближається до критичного рівня. Після застосування керувальних дій усі сценарії мають однакове значення $\Omega_{new} \approx 0{,}36$, що істотно нижче за порогове значення. Це означає, що система переходить у стійкий режим із низькою інтенсивністю коригувальних перебудов із нечастими переконфігураціями.

Слід зазначити, що одержання близьких або однакових значень L_{new} та Ω для різних сценаріїв є наслідком прийнятого референтного стану x^* та обраної процедури оптимізаційного коригування. Тому наведені графіки демонструють поведінку моделі за умови, що обмеження на коригувальні дії є допустимими, а параметри цільового стану задані як досяжні. Сценарний аналіз доцільно доповнювати перевіркою чутливості результатів до зміни

вагових коефіцієнтів, вибору цільового стану x^*, порогового значення L_{crit}, допустимих меж Δp_i та семантичних обмежень для критичних сегментів.

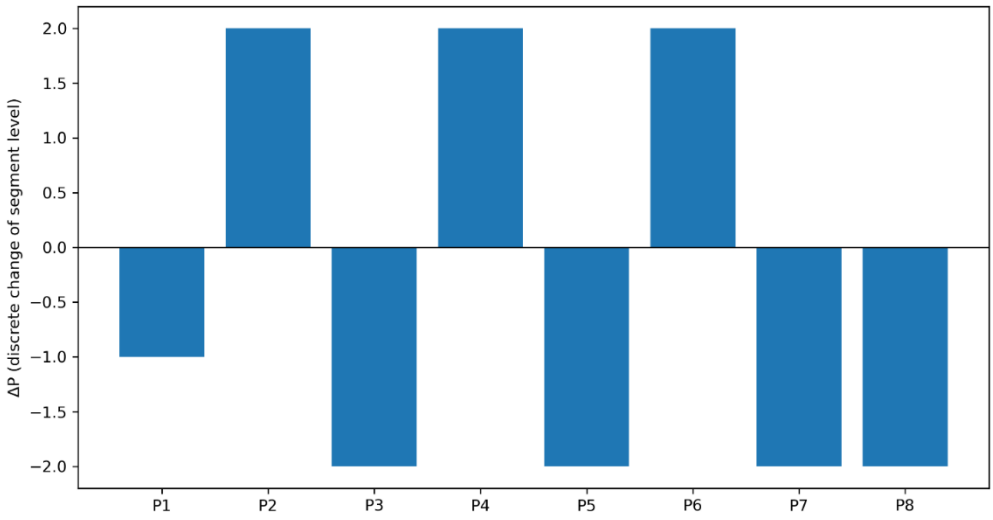


Рисунок 2.5. Стовпчикова діаграма рекомендацій ΔP_i

Стовпчикова діаграма дискретних рекомендацій ΔP_i, наведена на рисунку 2.5, відображає сценарій «Операційна криза» та ілюструє перерозподіл зусиль між сегментами. Модель пропонує помірне зменшення навантаження на сегмент P_1 та суттєве посилення сегментів P_2, P_4 і P_6 (маневрування, людський фактор у підготовці екіпажів, екологічну безпеку).

Щодо P_3, P_5, P_7 і P_8 пропонується перегляд надлишкових або дубльованих процедур, перерозподіл ресурсів і зменшення процедурного перевантаження без порушення мінімально допустимого рівня функціонування критичних сегментів.

Окремо наведено програмно сформований звіт із результатами сценарних розрахунків (рис. 2.6).

Check of L and Ω against Table 5 (paper vs calculated):

	Scenario	L_paper	L_calc	Omega_paper	Omega_calc
0	1. Baseline stable	0.700	0.700	0.46	0.457143
1	2. Norms tightening	0.700	0.700	0.63	0.628571
2	3. Operational crisis	0.480	0.480	1.38	1.375000
3	4. Geopolitical shock	0.420	0.420	1.57	1.571429
4	5. Improvement programme	0.675	0.675	0.71	0.711111
5	6. New balanced	0.935	0.935	0.40	0.363636

```
Normalised influence matrix A (row sums = 1):
       P1     P2     P3     P4     P5     P6     P7     P8
ω3  0.091  0.182  0.182  0.091  0.091  0.091  0.091  0.182
I3  0.194  0.129  0.065  0.194  0.097  0.065  0.065  0.194
Ht  0.061  0.182  0.182  0.121  0.121  0.121  0.121  0.091
Gt  0.240  0.080  0.080  0.080  0.160  0.160  0.080  0.120
St  0.133  0.000  0.000  0.000  0.267  0.267  0.133  0.200
θ   0.133  0.133  0.133  0.133  0.067  0.133  0.067  0.200
τ   0.114  0.114  0.114  0.114  0.171  0.171  0.086  0.114
Row-sum check: {'ω3': 1.0, 'I3': 1.0, 'Ht': 1.0, 'Gt': 1.0,
```

```
Matrix B (with amplitudes and signs):
       P1     P2     P3     P4     P5     P6     P7     P8
ω3  0.045  0.091  0.091  0.045  0.045  0.045  0.045  0.091
I3  0.058  0.039  0.019  0.058  0.029  0.019  0.019  0.058
Ht -0.036 -0.109 -0.109 -0.073 -0.073 -0.073 -0.073 -0.055
Gt -0.096 -0.032 -0.032 -0.032 -0.064 -0.064 -0.032 -0.048
St -0.093 -0.000 -0.000 -0.000 -0.187 -0.187 -0.093 -0.140
θ  -5.333 -5.333 -5.333 -5.333 -2.667 -5.333 -2.667 -8.000
τ  -0.046 -0.046 -0.046 -0.046 -0.069 -0.069 -0.034 -0.046
```

Рисунок 2.6. Фрагмент сценарного розрахунку параметрів аналого-індикаторної моделі

Результати автоматизованого формування рекомендацій для кожного сценарію наведено на рисунку 2.7.

```
SCENARIO: 1. Baseline stable
Current state x^(s): {'ω3': 1.0, 'I3': 0.7, 'Ht': 0.3, 'Gt': 0.4, 'St': 0.2, 'θ': 15.0, 'τ': 0.32}
Desired state x*:    {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:
                                Segment  delta_p_continuous  intensity_r = |delta_p|  deltaP_discrete                Recommendation           Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)           -1.467                    1.467               -2 significantly decrease segment 1. Baseline stable
  P2. Traffic safety & manoeuvring automation            6.436                    6.436                2 significantly increase segment 1. Baseline stable
 P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)           -6.282                    6.282               -2 significantly decrease segment 1. Baseline stable
            P4. Human factor & crew training            0.727                    0.727                2 significantly increase segment 1. Baseline stable
     P5. Security, protection & cybersecurity           -0.874                    0.874               -2 significantly decrease segment 1. Baseline stable
           P6. Environmental safety (MARPOL)            -0.770                    0.770               -2 significantly decrease segment 1. Baseline stable
               P7. Emergency readiness & SAR            1.905                    1.905                2 significantly increase segment 1. Baseline stable
         P8. Analytics, risk management & DSS           1.185                    1.185                2 significantly increase segment 1. Baseline stable
```

```
SCENARIO: 3. Operational crisis
Current state x^(s): {'ω3': 0.8, 'I3': 0.6, 'Ht': 0.8, 'Gt': 0.7, 'St': 0.3, 'θ': 40.0, 'τ': 0.66}
Desired state x*:    {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:
                                Segment  delta_p_continuous  intensity_r = |delta_p|  deltaP_discrete                Recommendation             Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)           -0.185                    0.185               -1    moderately decrease segment 3. Operational crisis
  P2. Traffic safety & manoeuvring automation           14.734                   14.734                2 significantly increase segment 3. Operational crisis
 P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)           -9.326                    9.326               -2 significantly decrease segment 3. Operational crisis
            P4. Human factor & crew training            1.212                    1.212                2 significantly increase segment 3. Operational crisis
     P5. Security, protection & cybersecurity           -3.308                    3.308               -2 significantly decrease segment 3. Operational crisis
           P6. Environmental safety (MARPOL)            7.032                    7.032                2 significantly increase segment 3. Operational crisis
               P7. Emergency readiness & SAR           -2.148                    2.148               -2 significantly decrease segment 3. Operational crisis
         P8. Analytics, risk management & DSS           -3.409                    3.409               -2 significantly decrease segment 3. Operational crisis
```

```
SCENARIO: 5. Improvement programme
Current state x^(s): {'ω3': 0.9, 'I3': 0.75, 'Ht': 0.4, 'Gt': 0.6, 'St': 0.4, 'θ': 25.0, 'τ': 0.48}
Desired state x*:    {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:
                                Segment  delta_p_continuous  intensity_r = |delta_p|  deltaP_discrete                Recommendation                Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)           -0.227                    0.227               -2 significantly decrease segment 5. Improvement programme
  P2. Traffic safety & manoeuvring automation           -7.526                    7.526               -2 significantly decrease segment 5. Improvement programme
 P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)            7.216                    7.216                2 significantly increase segment 5. Improvement programme
            P4. Human factor & crew training            2.817                    2.817                2 significantly increase segment 5. Improvement programme
     P5. Security, protection & cybersecurity           2.536                    2.536                2 significantly increase segment 5. Improvement programme
           P6. Environmental safety (MARPOL)            -2.900                    2.900               -2 significantly decrease segment 5. Improvement programme
               P7. Emergency readiness & SAR           -0.277                    0.277               -2 significantly decrease segment 5. Improvement programme
         P8. Analytics, risk management & DSS           1.535                    1.535                2 significantly increase segment 5. Improvement programme
```

Рисунок 2.7. Приклад формування попередніх експертно-сценарних рекомендацій

Запропонована аналого-індикаторна модель забезпечує сценарне оцінювання стійкості ІСНЗ, виявлення функціонально слабких сегментів і

ранжування коригувальних дій. Матриці впливу, вагові коефіцієнти та сценарні параметри сформовано на основі експертно-сценарного підходу; їх кількісне уточнення здійснюється за результатами тренажерних досліджень, аналізу AIS/ECDIS-даних, VTS/VDR-журналів, експлуатаційної статистики та матеріалів інцидентів. Результати такого аналізу можуть використовуватися в системах підтримки прийняття рішень з урахуванням фактичної навігаційної ситуації, оціненого ризику та нормативних вимог [20, 264, 270, 296].

Отже, у наступних розділах виникає необхідність розроблення спеціалізованих моделей інтелектуальної обробки навігаційної інформації, методів ідентифікації функціональних станів і професійно-кваліфікаційних характеристик оператора, підходів до формалізації та врахування людського фактора, а також засобів прогнозування та підтримки прийняття рішень в ергатичних системах навігаційного забезпечення та управління рухом суден [184, 190, 197].

2.3. Загальна схема формалізації та уніфікації навігаційних даних ІСНЗ для аналізу траєкторних ознак дій оператора

У межах дослідження дані ІСНЗ у вузькому технічному сенсі розглядаються як сукупність інформаційних записів, що відображають просторово-часовий стан судна, параметри його руху, маршрутні обмеження, інформаційне середовище містка та зовнішні умови керування.

До таких даних належать AIS-повідомлення, ECDIS-дані, GNSS-координати, дані гірокомпаса, лага, РЛС/ARPA, а також записи VTS/VDR, бортові журнали та метеорологічна інформація. Під час подальшої обробки дані AIS і GNSS використовуються переважно для реконструкції траєкторії; ECDIS – для зіставлення руху з маршрутом і межами безпеки; РЛС/ARPA – для оцінювання зближення; VTS/VDR та бортові журнали – для відновлення подій і контексту ухвалення рішень; метеодані – для врахування зовнішніх збурень. Отже, дані ІСНЗ розглядаються не як однорідний масив, а як сукупність даних із кількох взаємодоповнювальних джерел для формалізації траєкторних, кінематичних і поведінкових ознак дій оператора. Саме тому

формалізація навігаційних даних повинна трактуватися не як допоміжна процедура попередньої обробки, а як одна із базових методологічних процедур переходу від окремих вимірювань параметрів руху до структурованого подання траєкторних режимів, аномалій і можливих дій оператора [39, 188]. Подальша інтерпретація цих ознак як індикаторів операторського стану потребує їх зіставлення з часовими, поведінковими та психофізіологічними даними [208, 235, 292].

У загальному вигляді ергатична система навігаційного забезпечення може бути подана як багатокомпонентна структура:

$$\mathcal{E}(t) = \langle X_O(t), X_V(t), X_N(t), X_R(t) \rangle, \tag{2.19}$$

де $X_O(t)$ – стан оператора, $X_V(t)$ – стан судна як об’єкта керування, $X_N(t)$ – стан навігаційно-інформаційного середовища та технічних засобів спостереження, $X_R(t)$ – сукупність регламентних, процедурних і ситуаційних обмежень. Співвідношення (2.18) слід розглядати як концептуальний розклад стану ергатичної системи. Окремі складові $\mathcal{E}$ (t) мають різний ступінь спостережуваності (табл. 2.6).

Таблиця 2.6. Спостережувальність компонентів ергатичної системи у задачах аналізу даних ІСНЗ

Компонент	Зміст	Спостерігається безпосередньо	Оцінюється опосередковано	Залишається латентним
$X_V(t)$	стан судна	координати, курс, швидкість, ROT, траєкторія	маневрова інтенсивність, стабільність утримання курсу	внутрішні технічні режими, якщо немає журналів
$X_N(t)$	навігаційно-інформаційне середовище	AIS, ECDIS, GNSS, РЛС, VTS-дані	якість інформаційного поля, узгодженість джерел	частина невідомих зовнішніх впливів
$X_R(t)$	регламенти й обмеження	фарватери, TSS, COLREG, портові правила	рівень процедурної напруженості	неформалізовані рішення та ситуативні домовленості
$X_O(t)$	стан оператора	безпосередньо не спостерігається за стандартними даними ІСНЗ	реакція, затримка, варіативність керування, помилки	когнітивний стан, втома, стрес без додаткових датчиків

У задачах аналізу даних ІСНЗ вектор спостережень може бути поданий як:

$$Y(t)=\left\{t,\varphi,\lambda,COG,SOG,ROT,XTE,AIS_{msg},ECDIS_{route},VTS_{event},QC\right\}, \quad (2.20)$$

де: t – часовий ідентифікатор; φ, λ – географічні координати; COG, SOG, ROT – кінематичні параметри руху; XTE – поперечне відхилення від опорної або згладженої траєкторії; AIS_{msg} – повідомлення AIS; $ECDIS_{route}$ – маршрутні та картографічні дані ECDIS; VTS_{event} – події або повідомлення системи управління рухом; QC – ознаки якості та достовірності даних.

Потреба у формалізації зумовлена тим, що реальні масиви даних ІСНЗ є неоднорідними за структурою, форматами часу, способами подання координат, складом полів і повнотою записів. За відсутності єдиної процедури впорядкування такі дані залишаються непорівнянними між собою, а результати їх аналізу втрачають відтворюваність, порівнянність і методологічну цілісність. У такому вигляді вони не можуть виступати надійною основою ні для зіставлення окремих переходів судна, ні для виділення стійких характеристик маневрування, ні для включення людського фактора в аналітичний контур дослідження. Отже, формалізація є тим рівнем методологічного впорядкування, на якому різнорідний потік навігаційних спостережень перетворюється на єдиний опис, придатний для побудови моделей дій оператора [319].

Базовою одиницею аналізу доцільно вважати не окремий запис навігаційних даних, а цілісну впорядковану в часі траєкторію руху судна або її фрагмент, що відповідає певному режиму керування. Такий підхід зумовлений тим, що одиничний запис характеризує лише локальний стан системи в окремий момент часу, тоді як траєкторія відтворює просторово-часову послідовність руху, контекст маневрування та реалізовані зміни керувальних дій [41, 311]. У мінімальному вигляді траєкторія може бути подана як:

$$T_f=\left\{\left(t_i,\varphi_i,\lambda_i\right)\right\}_{i=1}^{N_f},\ f\in\Phi, \quad (2.21)$$

де Ф – множина траєкторій або зареєстрованих проходів судна, t_i – часова позначка, φ_i, λ_i – географічні координати, N_f – кількість спостережень. Подання (2.21) слід розглядати лише як мінімальну геометричну основу траєкторії, яка фіксує часову послідовність координат судна. Тому в подальшому мінімальне подання траєкторії розширюється до вектора стану спостереження, такого що:

$$z_i = \{t_i, \varphi_i, \lambda_i, SOG_i, COG_i, HDG_i, ROT_i, XTE_i, CPA_i, TCPA_i, e_i, q_i\}, \quad (2.22)$$

де SOG_i – швидкість над ґрунтом; COG_i – курс над ґрунтом; HDG_i – курс судна за гірокомпасом; ROT_i – кутова швидкість повороту; XTE_i – поперечне відхилення від маршруту або згладженої траєкторії; CPA_i, $TCPA_i$ – параметри небезпечного зближення; e_i – подієві ознаки, пов’язані з маневром, кермом, режимом роботи двигуна або зовнішньою командою; q_i – індикатор якості даних.

Подальші співвідношення визначають послідовність етапів інженерної обробки даних, тобто послідовність ETL-процедур (Extract, Transform, Load – вилучення, перетворення та завантаження даних) із різних джерел, приведення часу й координат до єдиного формату, формування кінематичних ознак, контроль якості та підготовку стандартизованого ряду до подальшої інтелектуальної інтерпретації.

$$\mathcal{N} : F^{(k)} \to S^{(k)}, \quad (2.23)$$

де $F^{(k)}$ – початковий ІСНЗ-файл, що відповідає k-му проходу, а $S^{(k)}$ – стандартизований просторово-часовий ряд із координатами, поданими в єдиній метричній системі. У загальному вигляді такий ряд може бути поданий як:

$$S^{(k)} = \left\{ \left(t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i \right) \right\}_{i=1}^{N_k}, \quad (2.24)$$

де t_i – час у єдиній шкалі спостереження, (x_i, y_i) – координати в локальній декартовій системі, COG_i – курс судна, ROT_i – кутова швидкість повороту, XTE_i – поперечне відхилення від згладженої або опорної траєкторії. У такому поданні траєкторія набуває не лише геометричного, а й кінематичного змісту, що принципово важливо для аналізу дій оператора [42].

Методологічна повнота уніфікованого подання визначається не лише складом змінних, а й системою вимог, яким воно має відповідати. Таку систему доцільно подати як:

$$\Re\left(S^{(k)}\right)=\left\{R_t,R_s,R_c,R_d,R_q,R_i\right\}, \tag{2.25}$$

де R_t – вимога часової уніфікації, R_s – просторової та метричної узгодженості, R_c – кінематичної сумісності параметрів руху, R_d – коректності побудови похідних ознак, R_q – контролю якості даних, R_i – інтерпретаційної придатності для задач аналізу дій оператора. Система вимог R_t, R_s, R_c, R_d, R_q, R_i визначає набір формалізованих процедур перевірки, які мають бути виконані перед використанням траєкторії в аналітичній моделі. Кожна вимога повинна мати власний тест, індикатор або поріг прийнятності (табл. 2.7).

Таблиця 2.7. Операціоналізація вимог до уніфікованого ІСНЗ-ряду

Вимога	Зміст	Формальний тест / індикатор	Типовий поріг	Дія при порушенні
R_t	часова уніфікація	монотонність часу, відсутність дубльованих часових позначок	$t_{i+1} > t_i$	сортування за часом, вилучення або агрегування дубльованих записів
R_s	просторова узгодженість	допустимість координат, відсутність стрибків	$d_i < d_{\max}$	одиничну аномальну точку вилучити або замінити після перевірки
R_c	кінематична сумісність	узгодженість (SOG), (COG), (ROT)	SOG < $V_{\max}$	маркування запису як недостовірного, повторне обчислення кінематичних параметрів
R_d	коректність похідних ознак	стійкість оцінених похідних після повторного обчислення	обмеження на ΔCOG / Δt	повторне обчислення після згладжування, застосування робастного фільтра або локальної апроксимації
R_q	контроль якості	частка пропусків, телеметричні розриви	менше заданого порогу	маркування рівня якості, інтерполяція лише коротких розривів, сегментація за тривалих розривів
R_i	інтерпретаційна придатність	достатня довжина фрагмента, наявність ключових полів	$N \geq N_{\min}$	виключення фрагмента з відповідного виду аналізу або зниження рівня довіри до його інтерпретації

Часова уніфікація полягає в узгодженні різнорідних форматів часу до єдиної відносної шкали спостереження. Для цього вводиться оператор

$$\Phi_t : \mathrm{Time}_i \to t_i,\ t_1 = 0,\ t_{i+1} > t_i, \tag{2.26}$$

де t_i трактується як час у секундах від початку проходу. Характерний крок дискретизації доцільно оцінювати робастним методом – за медіаною сусідніх часових інтервалів.

$$\Delta t = \mathrm{median}\left\{t_{i+1} - t_i\right\}_{i=1}^{N_k - 1}. \tag{2.27}$$

Після приведення часових позначок до єдиної шкали необхідно перевірити рівномірність дискретизації. Якщо часові інтервали між сусідніми спостереженнями є близькими до робастного кроку Δt, то подальші похідні ознаки можна обчислювати без додаткового вирівнювання. Якщо ж інтервали є нерівномірними, застосовується одна з трьох процедур: ресемплінг, інтерполяція або сегментація. Ресемплінг використовується тоді, коли траєкторія має достатню щільність спостережень і пропуски короткі. Інтерполяція допускається лише для коротких розривів, якщо її застосування не спотворює фактичну просторово-часову закономірність руху судна

Просторова уніфікація полягає у переході від географічного подання координат до локального метричного простору, в якому всі геометричні операції набувають безпосереднього фізичного змісту. Це перетворення може бути подане як:

$$\Phi_s : \left(\varphi_i, \lambda_i\right) \to \left(x_i, y_i\right). \tag{2.28}$$

Після такого переходу стає коректним використання евклідових операцій, зокрема обчислення локальних переміщень та відстаней:

$$d_{ij} = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2}. \tag{2.29}$$

Для переходу від географічних координат (φ, λ) до метричної площини в цьому дослідженні доцільно використовувати локальну дотичну систему координат ENU або відповідну проєкцію UTM для району спостереження. Локальна система ENU є зручною для аналізу обмежених акваторій, портових районів, фарватерів і ділянок інтенсивного маневрування, оскільки дає змогу

безпосередньо інтерпретувати координати *x*, *y* у метрах відносно вибраної опорної точки. Опорна точка (φ_0, λ_0) задається як початкова точка проходу, центр досліджуваної акваторії або інша фіксована точка, відносно якої виконується метричне перетворення [43, 239].

Після часової та просторової уніфікації виникає можливість переходу до формування похідних кінематичних і траєкторних ознак.

$$COG_i = \mathrm{mod}_{360}\left(\frac{180}{\pi} a\tan 2\left(\frac{dy_i}{dt}, \frac{dx_i}{dt}\right)\right). \tag{2.30}$$

Обчислення COG через локальний напрям руху є коректним лише за умови достатньої швидкості судна та відсутності значних телеметричних шумів. Якщо швидкість SOG є малою або судно перебуває в режимі зупинки, дрейфу чи повільного маневрування, різниці визначення курсу за координатами може призводити до нестійких значень COG. Тому в розрахунковій процедурі необхідно ввести умову: $SOG_i > V_{\min}$, де $V_{\min}$ – мінімальна швидкість, за якої напрям руху може вважатися інформативним для обчислення COG. Якщо $SOG_i \leq V_{\min}$, значення COG_i, отримане за координатами, не використовується безпосередньо, а маркується як ненадійне, згладжується або зіставляється з даними гірокомпаса HDG_i, якщо вони доступні; безпосередня заміна COG на HDG допускається лише з урахуванням дрейфу та зносу:

$$ROT_i \approx \frac{COG_{i+1}^{u} - COG_{i-1}^{u}}{2\Delta t}. \tag{2.31}$$

Оцінювання ROT_i за різницею розгорнутого курсу є чутливим до шуму координат, нерівномірності часових інтервалів і випадкових стрибків COG. Тому перед обчисленням похідної необхідно застосовувати попереднє згладжування курсового ряду або робастну оцінку локальної похідної. У такому випадку ROT_i обчислюється не за одиничною різницею сусідніх значень, а за згладженим рядом:

$$ROT_i = \frac{dCOG^{smooth}(t)}{dt}, \tag{2.32}$$

де $COG^{smooth}(t)$ – згладжений курсовий ряд, отриманий після фільтрації або локальної апроксимації. У поєднанні з часовою структурою спостережень цей параметр стає одним із базових індикаторів локальної керувальної активності.

Міжгалузеві дослідження фрактальних мікрорухів [44] демонструють загальну чутливість фрактальних характеристик до локальної мікродинаміки. У цій роботі відповідний математичний принцип адаптовано до аналізу мікроваріативності AIS/ECDIS-траєкторій [239].

Не менш важливим є обчислення поперечного відхилення від згладженого шляху. Для цього формують згладжену траєкторію $\left(x_i^s, y_i^s\right)$, визначають локальний дотичний вектор, будують нормаль до нього, а далі обчислюють проєкцію фактичного зміщення на цей нормальний напрям. У компактному вигляді це подається як: $XTE_i = \langle \Delta r_i,\ n_i \rangle$, де $\Delta r_i = \left(x_i - x_i^s, y_i - y_i^s\right)$ – вектор відхилення фактичної точки від згладженої траєкторії, n_i – одиничний нормальний вектор до згладженого шляху. Показник XTE_i має зміст лише за умови фіксації опорної траєкторії. Нею може бути або плановий маршрут з ECDIS (passage plan), або згладжена фактична траєкторія, побудована за спостереженнями із застосуванням сплайн-апроксимації, ковзного середнього, фільтрації чи алгоритму Дугласа-Пекера (Douglas-Peucker) із подальшим згладжуванням. У першому випадку XTE_i відображає відхилення від заданого маршруту, у другому – локальну просторову варіативність фактичної траєкторії. Тому спосіб побудови референтної лінії має бути обов’язково зазначений. Для того, щоб формалізовані траєкторні ознаки могли використовуватися саме в задачах аналізу дій оператора, необхідно встановити інтерпретаційний зв’язок між вимірюваними параметрами руху та можливими типами керувальних дій (табл. 2.8).

Таблиця 2.8. Можливі інтерпретаційні зв’язки між траєкторними ознаками та проявами керування судном

Ознака	Поведінкова інтерпретація	Можливий тип дії / мікроепізоду
Низька варіативність COG, мале абсолютне значення ROT	стабільне утримання напряму руху	рівномірне прямування
Плавна зміна ROT	контрольований початок повороту	плановий маневр
Різке зростання ROT	інтенсивна корекція курсу	екстрене або запізніле реагування
Зростання абсолютного значення XTE	відхід від опорної траєкторії	втрата точності утримання маршруту

Продовження таблиці 2.8.

Зменшення абсолютного значення XTE після відхилення	компенсаційна дія	повернення до опорного шляху
Коливання XTE навколо опорної лінії	нестійке утримання траєкторії	мікрокорекції / нестабільне керування
Зменшення CPA і TCPA за відсутності маневру ухилення	затримка реагування на зближення	потенційно небезпечний епізод
Зміна COG після зменшення TCPA	реакція на ризик зближення	маневр ухилення
Підвищена частота локальних змін COG	пошук режиму керування або невпевнене маневрування	нестійка схема керування
Високий рівень пропусків або QC-помилок	низька достовірність інтерпретації	епізод зі зниженою довірою

QC-протокол є обов'язковою умовою перед переходом до інтерпретації дій оператора. Якщо фрагмент не проходить контроль якості, він не повинен автоматично класифікуватися як прояв нестійкого або помилкового керування. У такому випадку траєкторний епізод отримує знижений рівень довіри або виключається з поведінкової інтерпретації.

Таким чином, вибудовується повний методологічний ланцюг переходу від сирих ІСНЗ-даних до інтерпретованих результатів аналізу [23, 146]. Для переходу від неперервної траєкторії до аналізу дій оператора вводиться поняття мікроепізоду керування. Під мікроепізодом розуміється часово обмежений фрагмент траєкторії, у межах якого зберігається відносно однорідний режим руху або спостерігається характерна зміна керувальних ознак: курсу, кутової швидкості повороту, поперечного відхилення, швидкості, параметрів зближення або подієвих маркерів.

Сегментація траєкторії може виконуватися за правилом зміни ознак:

$$B_i = 1\left(\begin{array}{l}|\Delta ROT_i| > \eta_{ROT} \vee |\Delta XTE_i| > \eta_{XTE} \vee |\Delta COG_i| > \\ > \eta_{COG} \vee CPA_i < CPA_{\min} \vee TCPA_i < TCPA_{\min} \vee e_i = 1\end{array}\right), \quad (2.33)$$

де $B_i = 1$ означає наявність межі нового мікроепізоду; ηROT, ηXTE, ηCOG – порогові значення зміни відповідних ознак; *CPAmin*, *TCPAmin* – мінімально допустимі пороги зближення; e_i – подієва ознака, що може відповідати команді, зміні режиму, аварійному повідомленню або зафіксованій зовнішній дії.

Запропонована процедура формалізації та уніфікації ІСНЗ-даних формує підготовлений простір ознак для подальшого інтелектуального аналізу

дій оператора. Її результатом є очищений, синхронізований і структурований просторово-часовий ряд із кінематичними, траєкторними, ризик-орієнтованими та якісними ознаками [39]. Саме такий ряд може бути надалі використаний для сегментації траєкторії, виділення мікроепізодів керування, класифікації поведінкових патернів і побудови моделей прогнозування дій оператора.

Формально задачу аналізу дій оператора на основі підготовлених ІСНЗ-даних можна подати як задачу переходу від очищеного ознакового опису траєкторії до множини інтерпретованих мікроепізодів керування:

$$\mathcal{Z}_f = \{z_i\}_{i=1}^{N_f} \to \mathcal{E}_f\left(E_m\right)_{m=1}^{M} \to \mathcal{A}_f = \{a_m\}_{m=1}^{M}, \tag{2.34}$$

де Z_f – очищений і уніфікований ознаковий опис проходу; E_m – мікроепізод керування; a_m – мітка класу траєкторного епізоду, який може бути пов’язаний із певним типом керувальної дії.

Кожний мікроепізод може бути описаний вектором:

$$\xi_m = \left\{ \Delta t_m, \overline{SOG}_m, \overline{ROT}_m, \sigma_{COG,m}, \overline{XTE}_m, CPA_m, TCPA_m, Q_m \right\}, \tag{2.35}$$

де Δt_m – тривалість епізоду; $\overline{SOG}_m$, $\overline{ROT}_m$, $\overline{XTE}_m$ – усереднені ознаки швидкості, повороту та відхилення; $\sigma_{COG,m}$ – варіативність курсу; CPA_m, $TCPA_m$ – параметри зближення; Q_m – рівень довіри до даних у межах епізоду.

Тоді подальша задача може бути сформульована як: $a_m = C\left(\xi_m\right)$, де $C(\cdot)$ – правило, експертний класифікатор або інтелектуальна модель, що відносить мікроепізод до одного з типів дій: стабільне утримання курсу, плановий поворот, компенсаційна корекція, запізніле реагування, нестійке маневрування, небезпечне зближення або епізод зі зниженою достовірністю.

2.4. Методологічні принципи інтеграції когнітивних та психофізіологічних станів оператора в контур управління ергатичною системою

У системах навігаційного забезпечення та управління рухом суден якість керування визначається не лише точністю навігаційних вимірювань і повнотою інформаційного забезпечення, а й поточним станом оператора. Під час несення

вахти він сприймає й оцінює навігаційну ситуацію, розподіляє увагу між джерелами інформації, прогнозує розвиток подій і обирає спосіб реалізації керувальних рішень в умовах дефіциту часу, інформаційного навантаження, відповідальності, втоми та нервово-емоційної напруженості. Тому когнітивні, функціональні й психофізіологічні стани оператора, включаючи ситуаційну обізнаність, сприйняття часу, мотиваційний стан і поточну працездатність, мають розглядатися як складова контуру управління ергатичної системи, а не як зовнішні щодо системи психологічні характеристики [314]. Функціональний стан оператора формується під сукупним впливом інформаційно-комунікаційного навантаження [98], тривалості роботи та режиму вахти [99, 102], втоми [100, 124, 206], стресу [96, 125], складності навігаційної ситуації й інтенсивності руху [60, 67, 111]. Для переходу від концептуального опису стану оператора до його використання в моделі ІСНЗ необхідно визначити операційне подання основних станів. У межах цього підрозділу кожний стан розглядається через сукупність спостережуваних або непрямих ознак, джерела їх отримання, можливий метод оцінювання та роль у контурі підтримки рішень (табл. 2.9).

Таблиця 2.9. Операційне подання когнітивних станів оператора в ергатичній системі навігаційного забезпечення

Когнітивний / функціональний стан	Ознаки прояву	Джерела спостереження	Метод оцінювання	Роль у контурі керування
Достатня ситуаційна обізнаність	своєчасні маневри, стабільний COG, контрольований XTE, адекватна реакція на CPA/TCPA	AIS/ECDIS, VTS, журнали, тренажер	індикаторний бал, експертна оцінка, класифікація епізодів	підтримання безпечного режиму
Інформаційне перевантаження	часті мікрокорекції, затримки реакції, нестійкий ROT, збільшення XTE	AIS/ECDIS, VDR, тренажер, eye-tracking	правила виявлення, класифікація методами машинного навчання (ML), аналіз часових затримок	підвищення ризику помилки

Продовження таблиці 2.9.

Втрата уваги / дефіцит контролю	тривалі інтервали без корекцій при зростанні ризику, запізніла реакція на зближення	AIS, ARPA, VTS, VDR	аналіз CPA/TCPA та часу реакції	перехід до небезпечного режиму
Стрес і нервово-емоційна напруженість	різкі маневри, нестабільні рішення, збільшення частоти змін курсу	VDR, тренажер, психофізіологічні датчики	індикатори варіативності, варіабельність серцевого ритму (HRV), експертна оцінка	зниження надійності рішень
Втома	повільна реакція, згладжена або запізніла корекція, зростання помилок утримання курсу	тренажер, VDR, журнали, психофізіологічні дані	часовий аналіз, індикатори реакції, експертна оцінка	зменшення запасу безпечного керування
Невпевнене маневрування	коливання COG, підвищений ROT, нестійкий XTE, повторні корекції	AIS/ECDIS, GNSS, VDR	сегментація мікроепізодів, класифікація патернів	ознака необхідності посилення підтримки прийняття рішень
Помилкова оцінка ситуації	виконаний маневр не забезпечує зниження ризику зближення, CPA/TCPA погіршується після дії	AIS/ARPA/VTS, журнали	порівняння до/після маневру, експертна валідація	критичний предиктор ризику

Отже, стан оператора слід розглядати як динамічну змінну, еволюція якої визначається перебігом роботи ергатичної системи. У загальному вигляді це може бути подано як:

$$\dot{X}_O(t) = \mathcal{F}\left(X_O(t), X_N(t), X_I(t), X_V(t)\right), \tag{2.36}$$

де $\mathcal{F}(\cdot)$ – оператор зміни стану оператора під впливом навігаційної ситуації, інформаційного поля та параметрів руху судна. Співвідношення (2.36) слід розглядати як структурну постановку задачі опису стану оператора. У цій постановці $\dot{X}_O(t)$ є латентна змінна, тобто така, що не спостерігається безпосередньо в навігаційних даних, але може бути оцінена за сукупністю непрямих ознак [292].

Саме тому методологія повинна виходити не з одновимірного показника

«нормальний/ненормальний стан», а з багатовимірного опису та класифікації станів оператора (табл. 2.10).

Таблиця 2.10. Класи станів оператора в ергатичній системі навігаційного забезпечення

Клас стану	Приклади станів	Функціональний зміст	Можливі індикатори
Когнітивні стани	ситуаційна обізнаність, увага, антиципація, розуміння ризику, оцінка часу	визначають якість сприйняття, інтерпретації та прогнозування навігаційної ситуації	стабільність реакції на CPA/TCPA, своєчасність маневру, кількість пропущених значущих подій
Афективні стани	стрес, тривожність, емоційна напруженість	впливають на стабільність рішень, схильність до ризику або надмірної обережності	різкі корекції, нестійкий ROT, зміна темпу дій, психофізіологічні індикатори
Функціональні стани	втома, перевантаження, зниження працездатності, дефіцит ресурсу уваги	визначають здатність оператора підтримувати якість керування протягом вахти	затримка реакції, зростання XTE, збільшення помилок утримання курсу
Психофізіологічні стани	зміни серцевого ритму, напруженість, сенсомоторна реакція, окорухова активність	відображають фізіологічну основу навантаження, стресу та втоми	HRV, eye-tracking, EEG, час реакції, частота взаємодії з інтерфейсом
Поведінкові прояви	мікрокорекції, повторні маневри, запізнілі дії, нестійке маневрування	є зовнішньо спостережуваним результатом внутрішнього стану	COG, ROT, XTE, CPA/TCPA, подієві журнали, VDR/VTS

Класифікація когнітивних, афективних, функціональних, психофізіологічних і поведінкових станів спирається на дослідження структури психічних станів [69], уваги й ситуаційного оцінювання [111, 126], часової дисторсії [73–77, 208], стресу та втоми [96, 101, 104, 124, 125, 206].

У процесі несення вахти увага розподіляється між джерелами навігаційної інформації, приладами, зовнішніми об’єктами, засобами зв’язку, командами керування та навігаційними небезпеками [111]. У термінах ергатичної системи це означає, що зміни стану уваги слід розглядати як безпосередню причину зміни якості керування, а не лише як її психологічне тлумачення [126]. Також важливим є аналіз психофізіологічних станів, що супроводжують діяльність оператора. Для задач навігаційного забезпечення

це має особливе значення, оскільки навіть незначне погіршення точності або своєчасності дії в складній навігаційній обстановці може призвести до суттєвого підвищення рівня ризику [125]. Тому психофізіологічні стани повинні враховуватися не окремо від процесу керування, а як фактори, що змінюють якість роботи оператора в межах реального контуру керування [102]. Слід також враховувати часові характеристики діяльності оператора. У складних навігаційних умовах рішення формуються в умовах обмеженого часу, а тому точність сприйняття тривалості, послідовності та терміновості подій набуває принципового значення [208]. Показники зорової уваги оператора можуть ідентифікуватися за характеристиками його взаємодії з інформаційним полем [322], тоді як час реакції та часова структура дій формалізуються на основі моделей часової організації сенсомоторної діяльності й дисторсії суб'єктивного часу [190, 208, 220].

Крім цього, мотиваційна складова не повинна розглядатися лише як загальна психологічна характеристика особистості. У межах завдань управління рухом судна вона впливає на ступінь зібраності, наполегливість у дотриманні безпечної стратегії, схильність до ризику, прагнення дотримуватися безпечної стратегії або, навпаки, досягти оперативного результату ціною підвищення ризику [60, 103]. Окремо слід враховувати фізіологічні сигнали, показники рухової активності, часові характеристики взаємодії із засобами навігаційного забезпечення. Зміни цих показників можуть відображатися у параметрах траєкторії судна, характері мікрокорекцій курсу, інтенсивності маневрування, стабільності утримання шляху, часових затримках дій і розподілі уваги.

Принципово важливим обмеженням є те, що більшість когнітивних, афективних і функціональних станів оператора не спостерігається безпосередньо у стандартних навігаційних даних. AIS, ECDIS, GNSS, VTS або VDR фіксують переважно зовнішні прояви діяльності: траєкторію, курс, швидкість, маневри, події, команди, часові затримки та параметри зближення. Внутрішні стани: втома, стрес, втрата уваги, перевантаження, спотворення часової оцінки – залишаються латентними змінними.

Тому оцінювання $\dot{X}_O(t)$ повинно будуватися як задача непрямого

відновлення стану за множиною непрямих індикаторів. Залежно від режиму доступності – оперативного спостереження, квазіоперативного оцінювання або післядієвої діагностики – до таких індикаторів можуть належати траєкторні ознаки, часові затримки, характер мікрокорекцій, зміни ROT/XTE/COG, параметри CPA/TCPA, взаємодія з інтерфейсом, дані VDR, а за наявності спеціальних засобів – HRV, eye-tracking, EEG або показники часу реакції (табл. 2.11).

Таблиця 2.11. Режими доступності оцінювання стану оператора

Режим оцінювання	Що може оцінюватися	Джерела	Призначення
Оперативно спостережуваний режим	поточні траєкторні відхилення, різкі маневри, CPA/TCPA, XTE, COG/ROT	AIS, ECDIS, ARPA, VTS, GNSS	оперативне попередження, зміна рівня підказок, контроль ризику
Квазіоперативний режим	тенденція втоми, зростання навантаження, затримка реакції, нестійкий патерн керування	VDR, журнали ECDIS, журнали взаємодії на містку, аналіз у ковзному часовому вікні	адаптація СППР із короткою затримкою
Діагностика після дії	детальна оцінка когнітивного стану, втоми, стресу, помилкових рішень	тренажер, VDR, журнали, психофізіологічні сенсори, експертний розбір	післярейсовий аналіз, навчання, корекція процедур, оцінка підготовки

Отже, у контурі оперативного управління доцільно застосовувати лише ті індикатори, які є доступними в оперативному або квазіоперативному режимі. Тоді у загальному вигляді процедура оцінювання стану оператора може бути подана як:

$$\hat{X}_O(t) = \mathcal{D}\left(B_{obs}(t), Q_{phys}(t), W_{ctx}(t)\right), \tag{2.37}$$

де $\hat{X}_O(t)$ – оцінка стану оператора, $B_{obs}(t)$ – сукупність зовнішніх поведінкових і траєкторних ознак, $Q_{phys}(t)$ – доступні психофізіологічні показники, $W_{ctx}(t)$ – характеристики навігаційної ситуації та інформаційного навантаження.

Включення стану оператора до контуру управління не означає автоматичної заміни рішення оператора або прямого керування судном на основі психологічної оцінки. У даній постановці стан оператора використовується як модифікатор ризику та параметр адаптації системи підтримки прийняття рішень. Формально цей зв’язок можна подати як:

$$\hat{X}_O(t) \to k_H(t) \to R_H(t) \to DSS(t), \tag{2.38}$$

де $\hat{X}_O(t)$ – оцінка стану оператора; $k_H(t)$ – коефіцієнт модифікації ризику, що враховує стан оператора; $R_H(t)$ – ризик, пов'язаний із людським фактором; $DSS(t)$ – адаптована конфігурація системи підтримки прийняття рішень.

Оцінку стану оператора також необхідно безпосередньо включити до моделі поточного навігаційного ризику. Людський фактор повинен враховуватися не лише після виникнення помилки, небезпечної ситуації або аварійної події, а й на етапі поточного оцінювання ризику навігаційної ситуації [61]. Це означає, що стан оператора має бути включений до моделі ризику як один із її аргументів (табл. 2.12). У загальному вигляді ризик, зумовлений людським фактором, можна подати як:

$$R_H(t) = R\left(\hat{X}_O(t), X_N(t), X_V(t)\right), \tag{2.39}$$

де $R_H(t)$ – поточний ризик, пов'язаний із діями оператора в конкретній навігаційній ситуації. У такій постановці ризик визначається не лише зовнішніми навігаційними умовами, а й тим, у якому стані перебуває оператор.

Таблиця 2.12. Джерела непрямих індикаторів стану оператора

Група індикаторів	Приклади	Джерело отримання	Доступність на містку
Траєкторні	COG, ROT, XTE, SOG, CPA/TCPA	AIS, ECDIS, GNSS, ARPA	висока
Часові	затримка реакції, час до маневру, інтервал між попередженням і дією	VDR, журнали ECDIS, ARPA/VTS events	середня / висока
Поведінкові	частота мікрокорекцій, повторні дії, нестійкий патерн керування	VDR, журнали взаємодії оператора із засобами містка, тренажер	середня
Інтерфейсні	журнал натискань і переходів між елементами інтерфейсу, перемикання режимів, частота звернення до дисплеїв	ECDIS/VDR, HMI logs	середня
Окорухові	фіксації, саккади, розподіл погляду	eye-tracking	низька на реальному флоті, висока в тренажері

Продовження таблиці 2.12

Фізіологічні	HRV, пульс, електродермальна активність	носимі датчики	обмежена
Нейрофізіологічні	EEG, індикатори когнітивного навантаження	EEG-сенсори	переважно тренажерна
Експертні	оцінка інструктора, розбір VDR, післядієвий аналіз	тренажер, навчальний центр, розслідування	післядієвий режим

Для практичного використання на реальному флоті важливим є принцип мінімальної інвазивності. Це означає, що перевагу слід надавати тим індикаторам стану оператора, які можуть бути отримані без істотного втручання у штатну діяльність оператора на містку та без створення додаткового навантаження. До таких індикаторів належать траєкторні ознаки, часові характеристики реакції, взаємодія з ECDIS/ARPA, події VDR, параметри CPA/TCPA та дані про взаємодію оператора із засобами містка.

Психофізіологічні сенсори: HRV, EEG, eye-tracking або електродермальні показники можуть бути корисними для тренажерної валідації, експериментальних досліджень і калібрування моделей, однак їх використання в штатному контурі реального суднового управління потребує окремого обґрунтування, нормативного дозволу та прийнятності для екіпажу.

Якщо система діагностики фіксує зростання навантаження, втому, погіршення розподілу уваги або підвищення ризику помилки, інформаційно-аналітична система може адаптувати режим своєї роботи: переупорядковувати пріоритети повідомлень, зменшувати інформаційне перевантаження, посилювати попередження, активізувати підтримку прийняття рішень, а в критичних випадках – ініціювати перехід до компенсаційних режимів. У формальному вигляді це може бути подано як:

$$\Gamma(t) = \mathcal{A}\left(X_O(t), R_H(t)\right), \tag{2.40}$$

де $\Gamma(t)$ – конфігурація інформаційно-аналітичної підтримки, яка змінюється залежно від стану оператора та рівня ризику. Такий підхід є визначальним для побудови адаптивної системи навігаційного забезпечення, здатної не лише фіксувати небезпечні дії, а й запобігати їх розвитку [203].

Окремі proxy-індикатори підлягають контекстній інтерпретації. Зокрема, висока маневрова активність може бути зумовлена складною навігаційною ситуацією, дією течії, виконанням інструкції VTS, плановим маневром або реакцією на зближення, тому її оцінюють у сукупності з параметрами середовища, ризику та режиму керування. Аналогічно, затримка реакції може бути зумовлена не втомою, а очікуванням підтвердження, зовнішньою командою, обмеженням простору для маневру або нормативною вимогою.

Тому оцінювання стану оператора має виконуватися за принципом багатоканальної верифікації (табл. 2.13). Висновок про стан може формуватися лише тоді, коли кілька незалежних груп ознак узгоджено свідчать про один і той самий тип стану. Формально це можна подати як:

$$Conf\left(\hat{X}_O\right) = f\left(B_{traj}, B_{time}, B_{in}, Q_{phys}, W_{context}\right), \tag{2.41}$$

де $Conf\left(\hat{X}_O\right)$ – рівень довіри до оцінки стану; B_{traj} – траєкторні ознаки; B_{time} – часові ознаки; B_{in} – ознаки взаємодії з інтерфейсом; Q_{phys} – доступні психофізіологічні індикатори; $W_{context}$ – контекст навігаційної ситуації.

Таблиця 2.13. Адаптація СППР залежно від оціненого стану оператора

Оцінений стан $\hat{X}_O(t)$	Адаптація у СППР
Нормальний функціональний стан	стандартні пороги попереджень і звичайний режим інтерфейсу
Підвищене навантаження	зниження порогу ризикового попередження, підвищення пріоритету CPA/TCPA
Ознаки втоми	збільшення частоти нагадувань, контроль затримки реакції, рекомендація залучити другого оператора
Ознаки стресу / нестійкого маневрування	спрощення інтерфейсу, фокус на критичних параметрах, посилення DSS-підказок
Втрата уваги / пропуск значущих подій	негайне попередження, підвищення рівня підтримки, рекомендація зовнішньої координації
Низька достовірність оцінки стану	система не робить жорстких висновків, а лише позначає потребу в додатковій перевірці

Таким чином, оцінка стану оператора використовується не як самостійна команда керування, а як параметр адаптації СППР. Її роль полягає у зміні чутливості системи до ризикових подій, налаштуванні порогів попереджень, регулюванні частоти подання рекомендацій, зміні рівня деталізації інтерфейсу

та визначенні необхідності додаткової координації (табл. 2.14). За низької достовірності оцінки стану СППР не повинна автоматично підвищувати рівень втручання, а має вимагати додаткового підтвердження.

Таблиця 2.14. Ієрархія характеристик оператора в ергатичній системі навігаційного забезпечення

Рівень характеристики	Приклади	Темп зміни	Роль у моделі
Сталі характеристики	базова кваліфікація, професійний досвід, типові стратегії прийняття рішень, рівень підготовки	змінюються повільно, протягом навчання або професійного розвитку	визначають базовий рівень надійності дій і початкові параметри моделі
Повільні змінні	накопичена втома, тривале перевантаження, адаптація до району плавання, зниження функціонального ресурсу протягом вахти	від кількох годин до тривалості вахти або рейсу	визначають наявний функціональний ресурс і стійкість діяльності оператора
Швидкі функціональні стани	увага, стрес, ситуаційна обізнаність, часова напруженість, реакція на ризик, короткочасне перевантаження	секунди, хвилини, окремий навігаційний епізод	впливають на поточне рішення, маневр, затримку реакції та ризик помилки
Поведінкові прояви	мікрокорекції курсу, повторні маневри, запізнілі реагування, нестійкий ROT/XTE	спостерігаються в поточній траєкторії	використовуються як непрямі ознаки для непрямого оцінювання стану

Такий поділ дає змогу уникнути змішування кваліфікації, індивідуально-професійних характеристик, поточної втоми та миттєвих функціональних станів. У моделі вони мають різну роль: сталі характеристики задають базовий рівень підготовленості, повільні змінні відображають накопичену зміну функціонального ресурсу, а швидкі стани впливають на конкретні рішення в межах навігаційного епізоду (табл. 2.15).

Таблиця 2.15. Зв’язок станів оператора з можливими помилками та ризиковими проявами

Стан / характеристика	Можливий поведінковий прояв	Можлива помилка або ризиковий ефект
Втрата ситуаційної обізнаності	несвоєчасна реакція на зміну CPA/TCPA, пропуск значущої цілі	запізнілий маневр, небезпечне зближення
Інформаційне перевантаження	часті перемикання уваги, нестійкі мікрокорекції, зростання ROT	помилка пріоритету, вибір нераціонального маневру
Втома	збільшення часу реакції, зростання XTE, уповільнене коригування	несвоєчасне повернення до маршруту, зниження точності керування
Стрес / афективна напруженість	різкі маневри, надмірна частота корекцій, нестабільність рішень	надмірне або передчасне ухилення, порушення плавності маневру
Невпевнене маневрування	коливання COG, повторні зміни курсу, нестійкий ROT	зниження енергетичної ефективності та погіршення траєкторних показників, підвищення ризику
Тимчасове зниження функціонального ресурсу	зниження темпу обробки інформації, пропуск повідомлень	помилка оцінювання ситуації, потреба в додатковій підтримці
Недостатня кваліфікація або досвід	неправильна інтерпретація ситуації, слабке прогнозування	систематично помилковий вибір рішення

Наведені зв’язки не означають прямого детермінізму між станом оператора та помилкою. Вони задають імовірнісну логіку: певні стани підвищують імовірність окремих типів помилок або ризикових проявів. Тому в моделі стан оператора має розглядатися як модифікатор ризику, а не як безпосередня або єдина причина помилки.

Отже, у підрозділі сформовано концептуально-методологічну рамку інтеграції стану оператора в ергатичну систему навігаційного забезпечення. Її сутність полягає у тому, що когнітивні, функціональні, психофізіологічні та поведінкові характеристики оператора розглядаються як латентні або частково спостережувані змінні, які можуть впливати на ризик, якість рішень, своєчасність реакції та потребу в адаптації СППР. Запропонований підхід створює методологічну основу для подальшої побудови моделей оцінювання стану оператора та адаптації СППР. Він визначає класи станів, джерела непрямих індикаторів, режими доступності для оцінювання, принципи

мінімальної інвазивності, обмеження інтерпретації та механізм включення оцінки стану в контур підтримки прийняття рішень.

Подальша конкретизація цього підходу наводиться в розділі 4, а її експериментальна перевірка за даними тренажерних експериментів, спостережень за діяльністю операторів і даними ІСНЗ наведена в розділі 6.

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі сформовано методологічну основу для подальшого розроблення моделей і методів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення. Оператор, інформаційне поле, параметри руху судна, навігаційна ситуація, технічні засоби, зовнішні обмеження та людський фактор розглянуто як взаємопов’язані елементи єдиного контуру управління.

У підрозділі 2.1 обґрунтовано концептуально-структурну модель інформаційного поля оператора. Показано, що це поле є не просто сукупністю навігаційних повідомлень, а функціонально впорядкованим середовищем, у якому інтегруються вимірювальні, просторово-обстановчі, нормативно-процедурні, комунікаційні та ризик-орієнтовані дані [22]. Належна організація такого середовища створює інформаційні передумови для підтримання ситуаційної обізнаності, своєчасного оцінювання небезпеки та обґрунтування керувальних дій оператора.

У підрозділі 2.2 запропоновано аналого-індикаторну модель стійкості та керованої динаміки ергатичної системи навігаційного забезпечення. Її призначення полягає у формалізованому описі відхилення від експертно-заданого режиму безпеки, запасу стійкого функціонування, збурювальної напруженості, частоти коригувальних перебудов і потреби в коригувальних керувальних діях [141, 252]. Модель побудовано як систему нормованих індикаторів стійкості, збурювальної напруженості, структурно-функціональної зрілості та інтенсивності коригувальних перебудов ІСНЗ. Експертні матриці впливу, вагові коефіцієнти та сценарні параметри забезпечують структуризацію взаємозв’язків між функціональними сегментами системи та індикаторами її стійкості; їх кількісне уточнення

передбачено в межах експериментальної верифікації на основі результатів тренажерних досліджень, аналізу AIS/ECDIS-даних, VTS/VDR-журналів, експлуатаційної статистики, матеріалів інцидентів тощо [169].

У підрозділі 2.3 сформовано загальну схему формалізації та уніфікації навігаційних даних ІСНЗ для аналізу траєкторій дій оператора. Уточнено склад таких даних, розмежовано їхні джерела та визначено базову одиницю аналізу – впорядковану в часі траєкторію або її фрагмент. Обґрунтовано необхідність часової та просторової уніфікації, контролю якості, формування кінематичних ознак, визначення опорної траєкторії для ХТЕ, а також переходу до мікроепізодів керування.

У підрозділі 2.4 сформовано концептуально-методологічну рамку інтеграції стану оператора в контур управління ІСНЗ. Когнітивні, функціональні, психофізіологічні та поведінкові характеристики оператора можуть оцінюватися за допомогою непрямих індикаторів: траєкторіальних, часових, поведінкових, інтерфейсних, комунікаційних і психофізіологічних. Така оцінка має використовуватися не як автоматична діагностика особистості, а як модифікатор ризику та параметр адаптації системи підтримки прийняття рішень [320].

Таким чином, результатом розділу 2 є методологічна основа дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 3. Теоретичне обґрунтування та фрактально-епізодне моделювання обробки ІСНЗ-траєкторій для виділення індикаторів мікроваріативності керування судном

3.1. Теоретичні засади фрактального аналізу ІСНЗ-траєкторій для виявлення мікрорухів судна та траєкторних індикаторів керування в ергатичних системах судноводіння

У розділах 1 і 2 обґрунтовано, що в задачах управління ергатичними системами судноводіння принципове значення має не лише фіксація кінцевих параметрів руху судна, а й виявлення траєкторних індикаторів керування судном, що проявляються у структурі та локальних геометричних ознаках траєкторії [24, 247]. Формалізоване подання таких індикаторів через параметри COG, ROT, XTE та локальні фрактальні характеристики реалізується в уніфікованій процедурі обробки AIS/ECDIS-траєкторій [239].

У межах цього розділу об’єктом безпосереднього формалізованого аналізу є не внутрішній психологічний стан оператора і не окремі дії оператора, а траєкторна реалізація руху судна, зафіксована засобами інформаційної системи навігаційного забезпечення. Тому всі подальші фрактальні, динамічні та епізодні показники слід розглядати як траєкторні індикатори керування, що відображають просторово-часову нерегулярність руху, локальні мікрокорекції, змінність курсу, поперечні відхилення та інтенсивність маневрування.

Зв’язок таких індикаторів із людським фактором має інтерпретаційний характер і не ототожнюється з прямою ідентифікацією дій конкретного оператора. Траєкторні ознаки можуть бути зумовлені керувальними рішеннями оператора, зовнішніми умовами, режимом роботи автопілота, обмеженнями фарватеру, гідрометеорологічними чинниками, особливостями реєстрації даних або поєднанням зазначених факторів. Саме тому в цьому розділі розробляється не психологічна модель поведінки оператора, а методика виділення, нормалізації, фрактального опису та ризик-орієнтованої інтерпретації траєкторних індикаторів керування судном.

Разом з тим, практичне використання ІСНЗ-даних для формалізованого виявлення таких ознак залишається обмеженим. Причина полягає, по-перше, у неоднорідності форматів траєкторних даних, які надходять у різних системах координат, одиницях вимірювання та форматах часу, а по-друге, у недостатній чутливості традиційних кінематичних і геометричних показників до локальних проявів керування. Унаслідок цього великі масиви навігаційних записів не є безпосередньо зіставними без попередньої уніфікації, а аналіз траєкторних проявів керування судном часто зводиться або до загальних інтегральних характеристик рейсу, або до експертної візуальної інтерпретації окремих епізодів [28]. З огляду на це, виникає наукова потреба в такому підході до обробки навігаційної інформації, який забезпечував би одночасно: уніфікацію різноформатних ІСНЗ-траєкторій, багатомасштабний аналіз локальної структури руху, виділення мікроепізодів керування та їх подальше формалізоване подання у вигляді простору ознак. Прогнозування траєкторій і ризикових станів розглянуто у працях [188, 222], а геометричні та динамічні характеристики повороту судна у працях [227, 231, 277, 286]. Водночас поєднання нормалізації різноформатних AIS/ECDIS-даних, ковзного фрактального аналізу, виділення мікроепізодів та їх кодового подання реалізовано в підходах [239, 274].

Методично найбільш придатним для цього є фрактальний підхід, оскільки саме він дає змогу описувати не лише загальну форму траєкторії, а й її локальну нерегулярність, складність і масштабно-залежну організацію [37]. На відміну від класичних статистичних або геометричних характеристик, фрактальні показники дають змогу виявляти короткі ділянки підвищеної мікроваріативності, які можуть відповідати напруженому маневруванню, нестійкості в утриманні курсу, надлишковим корекціям або іншим непрямим проявам поведінки оператора.

Аналіз наукових джерел свідчить, що фрактальні методи вже застосовувалися до даних ІСНЗ, однак переважно для опису глобальної геометрії траєкторії та формування її ознак, фільтрації великих потоків даних або класифікації типів руху. Методи аналізу форми, кластеризації та

розпізнавання траєкторій уже широко застосовуються до AIS-даних [24, 26, 39, 146].

Незважаючи на розвиток методів кластеризації, прогнозування та виявлення аномалій AIS-траєкторій [38–41], недостатньо розробленою залишається процедура, що послідовно поєднує нормалізацію даних, ковзний фрактальний аналіз, виділення мікроепізодів, їх символізацію та інтегральне подання. Отже, у межах цього розділу основне завдання полягає у розробленні формалізованої методики фрактально-епізодного аналізу ІСНЗ-траєкторій, яка забезпечує перетворення різноформатних навігаційних записів у нормалізовані метричні ряди, обчислення фрактальних і динамічних показників у ковзних вікнах, виділення епізодів підвищеної мікроваріативності руху та формування фрактальної сигнатури рейсу. Отримана сигнатура формує простір ознак для подальшої експертної, статистичної та ризик-орієнтованої інтерпретації траєкторних проявів керування судном [243].

Для досягнення поставленої мети у розділі розв’язуються такі завдання:

1. Проаналізувати структуру траєкторних даних ІСНЗ та розробити універсальну процедуру автоматизованого зчитування і нормалізації траєкторій з різними форматами координат і часу з переведенням їх до єдиної метричної системи $S(k) = \{t_i, X_i, Y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i\}$ для кожного рейсу [239, 279].

2. Сформувати систему фрактальних і динамічних показників, що характеризують геометрію, нерегулярність і мікроваріативність руху судна у ковзних вікнах.

3. Розробити метод виявлення та агрегації епізодів мікрорухів на основі квантильних порогів фрактальних показників з урахуванням обмежень щодо тривалості епізоду та допустимих розривів між вікнами.

4. Побудувати методику фрактального кодування епізодів у вигляді кодів FC-$d_1 \ldots d_6$ та розробити процедуру розрахунку ризик-орієнтованого індексу епізодної складності як індикатора локальної складності і напруженості траєкторної реалізації керування.

5. Визначити межі інтерпретації отриманих індикаторів шляхом розмежування сигнального, маневрового та поведінкового рівнів аналізу.

Для уникнення змішування вимірюваних параметрів руху судна з непрямими поведінковими інтерпретаціями у роботі вводиться трирівнева схема аналізу траєкторних індикаторів, доповнена зовнішнім контуром валідації.

Перший рівень – сигнальний. На цьому рівні безпосередньо аналізуються вимірювані або обчислювані параметри ІСНЗ-траєкторії: координати X_i, Y_i, курс COG_i, кутова швидкість повороту ROT_i, поперечне відхилення XTE_i, фрактальні розмірності та локальні статистики у ковзних вікнах. Результати цього рівня є безпосередньо вимірюваними або обчислюваними і не потребують припущень щодо причин походження зафіксованих відхилень.

Другий рівень – маневровий. На цьому рівні сукупність сигнальних ознак інтерпретується як прояв локальної мікроваріативності руху, підвищеної складності траєкторії, надлишкових мікрокорекцій, зміни плавності курсу або нестійкості маневрування. Така інтерпретація стосується вже не окремого сигналу, а структури руху судна в межах певного часового фрагмента або рейсу.

Третій рівень – поведінковий. На цьому рівні траєкторні та маневрові індикатори можуть розглядатися як непрямі ознаки впливу людського фактора, зокрема стилю керування, напруженості прийняття рішень або зміни режиму взаємодії оператора з навігаційною інформацією. Проте такий перехід має статус інтерпретаційної гіпотези і потребує додаткової валідації за зовнішніми змінними: режимом роботи автопілота, гідрометеорологічними умовами, типом ділянки маршруту, даними журналів маневрів, експертною розміткою або результатами тренажерних експериментів.

Отже, у цьому розділі доведеними результатами є побудова нормалізованого простору ознак, виділення епізодів мікроваріативності руху, їх фрактальне кодування та ризик-орієнтована індексація. Поведінкова інтерпретація цих епізодів є подальшим рівнем аналізу та здійснюється з урахуванням зовнішнього навігаційного, технічного й операційного контексту, наведеного в табл. 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1. Рівні інтерпретації траєкторних індикаторів керування судном

Рівень аналізу	Предмет аналізу	Статус результату	Що можна стверджувати	Що не можна стверджувати без додаткових даних
Сигнальний рівень	XTE, ROT, COG, координати, фрактальні метрики, ковзні вікна	Вимірюваний / обчислюваний	Зафіксовано локальну нерегулярність, змінність або підвищену складність сигналу	Що це безпосередньо спричинено діями оператора
Маневровий рівень	Мікроепізоди, фрактальна активність, коди FC-$d_1 \ldots d_6$, ризик-орієнтований індекс епізодної складності	Формалізована інтерпретація структури руху	Має місце підвищена мікроваріативність руху або напруженість маневрування	Що встановлено конкретний психологічний стан оператора
Поведінковий рівень	Можливий зв'язок із людським фактором, стилем керування, навантаженням	Гіпотеза / експертна інтерпретація	Можна висунути припущення про вплив людського фактора	Не можна довести внесок оператора без зовнішніх змінних
Валідаційний контур	Автопілот, погода, течія, фарватер, журнали маневрів, експертна розмітка	Додаткове підтвердження	Можна уточнити джерело мікроваріативності	Не можна ігнорувати контекст руху

Таблиця 3.2. Зовнішні змінні, необхідні для переходу від траєкторних індикаторів до поведінкової інтерпретації

Група змінних	Приклади	Роль у валідації
Режим керування	ручне керування, автопілот, змішаний режим	Дає змогу відокремити внесок оператора від автоматизованого керування
Гідрометеорологічні умови	вітер, течія, хвилювання, видимість	Дає змогу врахувати зовнішні причини нестійкості траєкторії
Навігаційний контекст	стиснені води, портова зона, поворотна ділянка, зона розходження	Пояснює природне зростання мікрокорекцій у складних ділянках маршруту
Технічний контекст	частота реєстрації, якість сигналу, пропуски даних, похибки координат	Дає змогу відокремити реальні мікрорухи від спотворених даних
Операційний контекст	журнал маневрів, команди на містку, зміна вахти, тренажерний сценарій	Дає підстави для зв'язку траєкторних ознак із діями екіпажу
Експертна розмітка	оцінка інструктора, навігаційний розбір, класифікація складних епізодів	Забезпечує зовнішню перевірку поведінкової інтерпретації

Далі подано уніфіковане метричне представлення траєкторії судна, сформоване з різноформатних ІСНЗ-файлів (t_i, X_i, Y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i), яке слугує основою для подальшого фрактального аналізу.

3.1.1. Структура траєкторних даних ІСНЗ та формальна постановка задачі нормалізації

Нехай на вході маємо множину траєкторних файлів:

$$\mathcal{F} = \left\{ F^{(k)} \right\}_{k=1}^{K}, \tag{3.1}$$

де кожний файл $F^{(k)}$ відповідає одному рейсу або окремому фрагменту руху судна. Формально файл $F^{(k)}$ розглядається як прямокутна таблиця:

$$F^{(k)} = \left\{ z_{i,j}^{(k)} \mid i = 1,\ldots,N_k,\ j = 1,\ldots,M_k \right\}. \tag{3.2}$$

i – номер запису в часовій послідовності, j – номер колонки. Типовий рядок такої таблиці може бути поданий як вектор:

$$\mathbf{z}_i^{(k)} = \left(\mathrm{Time}_i, \mathrm{Lat}_i, \mathrm{Lon}_i, \mathrm{COG}_i, \mathrm{SOG}_i, \ldots \right), \tag{3.3}$$

де окремі складові можуть бути відсутніми, мати різні назви, різні одиниці вимірювання та відмінні формати подання. Зокрема, часові значення можуть бути записані у вигляді текстових рядків, повної позначки дати й часу, числових представлень або Excel-формату; координати можуть бути задані в десяткових градусах, у форматі DMS або безпосередньо в локальній метричній системі.

Метою етапу нормалізації є побудова відображення:

$$\mathcal{N} : F^{(k)} \to S^{(k)}, \tag{3.4}$$

де $S^{(k)}$ – стандартизований траєкторний ряд у єдиному метричному та часовому поданні:

$$S^{(k)} = \left\{ \left(t_i, x_i, y_i, \mathrm{COG}_i, \mathrm{ROT}_i, \mathrm{XTE}_i \right) \right\}_{i=1}^{N_k^*}, \tag{3.5}$$

де:

t_i – відносний час спостереження від початку проходу ($t_1 = 0$);

(x_i, y_i) – координати у метрах у локальній декартовій системі;

COG_i – розгорнутий курс судна (градуси);

$\mathrm{ROT}_i = d\mathrm{COG}/dt$ – кутова швидкість повороту (град/с);

XTE_i – поперечне відхилення від згладженої траєкторії (м).

За потреби в структурі $S^{(k)}$ додатково можуть зберігатися початкові географічні координати (φ_i, λ_i) для подальшої географічної прив'язки та візуалізації.

Таким чином, задача нормалізації зводиться до побудови двох базових відображень.

1. Часової уніфікації:

$$\Phi_t : \mathrm{Time}_i \to t_i \in \mathbb{R},\ t_i(\mathrm{sec}). \tag{3.6}$$

2. Просторової уніфікації:

$$\Phi_{xy} : (\mathrm{Lat}_i, \mathrm{Lon}_i) or (X_i, Y_i) \to (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2. \tag{3.7}$$

У результаті виконання цих відображень різноформатні ІСНЗ-дані зводяться до єдиного узгодженого подання, придатного для подальшого фрактального аналізу, виділення мікроепізодів руху та побудови фрактальної сигнатури рейсу.

3.1.2. Автоматизоване зчитування таблиць та виявлення службових полів

Першим етапом нормалізації є імпорт вхідних траєкторних таблиць до єдиного табличного подання. З огляду на те, що ІСНЗ-дані можуть надходити у форматах CSV, XLS або XLSX з різною внутрішньою структурою, процедура імпорту повинна бути стійкою до зміщення заголовків, наявності службових рядків, порожніх полів і варіативності назв колонок.

Тому в роботі використовується універсальна процедура зчитування, яка:

- формує єдине табличне подання вхідних даних;
- виконує пошук рядка заголовків;
- нормалізує назви колонок;
- ідентифікує службові поля часу, координат і параметрів руху.

Після імпорту виконується процедура нормалізації назв колонок і побудови множини службових полів, до яких належать:

– поле часу;
– поле широти;
– поле довготи;
– поле курсу;
– поле швидкості;
– за наявності – поля локальних метричних координат.

Виявлення службових колонок здійснюється на основі словників ключових слів і правил відповідності назв полів. У результаті формується впорядкований набір змінних, який передається до процедур геоприв'язки, часової уніфікації та побудови нормалізованого траєкторного ряду.

З науково-методичної точки зору цей етап є принциповим, оскільки він забезпечує стійкість подальшого аналізу за умов неоднорідності джерел даних та усуває залежність від конкретного формату експорту навігаційних записів [48].

3.1.3. Визначення типу геоданих та логіка вибору координатних полів

Після ідентифікації службових колонок наступним кроком є визначення типу просторових даних. Для вхідних траєкторій можливі три основні режими подання координат:

1. еографічні координати в десяткових градусах;
2. географічні координати у форматі DMS;
3. безпосередньо метричні координати *X*, *Y*.

Якщо у структурі таблиці явно присутні колонки широти та довготи, спочатку перевіряється можливість їх інтерпретації як координат, у десяткових градусах. Якщо числові значення не відповідають типовим діапазонам географічних координат або подані у текстовому вигляді, виконується процедура їх розпізнавання у форматі DMS.

Для підтримки DMS-подання координат використовується співвідношення

$$\varphi = s \cdot \left(|\deg| + \frac{\min}{60} + \frac{\sec}{3600} \right), \tag{3.8}$$

де deg, min, sec – градуси, хвилини та секунди відповідно, а знак *s* визначається півкулею:

$$s = \begin{cases} -1, \text{ hem} \in \{S, W\}, \\ +1, \textit{інакше.} \end{cases} \tag{3.9}$$

аналогічне перетворення застосовується і для довготи.

У випадку, коли явні колонки широти та довготи відсутні, виконується пошук числових кандидатів на координатні поля за двома критеріями:

– достатня повнота значень у колонці;

– належність числових значень до допустимих діапазонів для широти і довготи.

Якщо у файлі наявні метричні координати *X*, *Y*, їх безпосередньо використовують як базове просторове подання.

На цій основі процедура визначення типу геоданих формує формалізований опис типу просторового подання траєкторії та встановлює один із трьох режимів: географічне подання в десяткових градусах, географічне подання у форматі DMS або локальне метричне подання. Якщо жоден із зазначених режимів не може бути надійно встановлений, файл класифікують як проблемний, і він підлягає окремому контролю якості [46].

3.1.4. Перетворення географічних координат у метричну систему

Для подальшого аналізу траєкторія має бути подана у метричному просторі, оскільки лише в такому випадку забезпечується коректне обчислення просторових відстаней, поперечних відхилень, кутових швидкостей і фрактальних характеристик шляху. Тому для географічних координат виконується відображення:

$$\Phi_{xy} : (\varphi_i, \lambda_i) \to (x_i, y_i). \tag{3.10}$$

Загалом таке перетворення реалізується стандартною геодезичною проєкцією, яка вибирається відповідно до району плавання та має забезпечувати достатню точність метричних обчислень під час локального траєкторного аналізу.

За відсутності бібліотечної проєкційної підтримки може бути

використана локальна апроксимація, центрована на районі маршруту. Для цього визначається реперна широта:

$$\varphi_0 = \text{mediani}\ \{\varphi_i\}, \tag{3.11}$$

після чого використовуються коефіцієнти масштабування:

$$\begin{aligned} m_{\text{lat}} &= 111132{,}954 - 559{,}822\cos(2\varphi_0) + 1{,}175\cos(4\varphi_0), \\ m_{\text{lon}} &= 111132{,}954\cos(\varphi_0). \end{aligned} \tag{3.12}$$

Тоді локальні метричні координати обчислюються як:

$$x_i = (\lambda_i - \lambda_{\min}) \cdot m_{\text{lon}},\ y_i = (\varphi_i - \varphi_{\min}) \cdot m_{\text{lat}}, \tag{3.13}$$

де $\lambda_{\min} = \min_i \lambda_i$, $\varphi_{\min} = \min_i \varphi_i$.

Така локальна система координат є зручною для подальшого аналізу, оскільки вона центрована в межах маршруту, зберігає метричну інтерпретацію відстаней і не потребує додаткового зовнішнього геоінформаційного контексту на етапі нормалізації.

У результаті цього етапу всі траєкторії, незалежно від початкового формату координат, подаються в єдиному метричному просторі, що створює основу для зіставного міжрейсового аналізу [35].

3.1.5. Уніфікація часової осі та оцінка кроку дискретизації

Наступним етапом є перетворення часового поля на уніфіковану відносну шкалу. Для цього задається відображення:

$$\Phi_t : c_t \to (t_1, ..., t_N),\ t_1 = 0,\ t_{i+1} - t_i = \Delta t\,. \tag{3.14}$$

Практично це означає, що часові значення, незалежно від їхнього первинного формату, перетворюються на значення часу в секундах від початку траєкторії.

Оскільки часові поля у вхідних ICHЗ-файлах можуть бути подані у вигляді текстового формату типу «HH:MM:SS», повного формату дати-часу, числових значень або Excel-подання часу, оцінка кроку дискретизації повинна бути робастною до пропусків, шуму та аномальних значень. З цією метою у роботі використовується медіана додатних різниць сусідніх часових міток:

$$\Delta t = \text{median}\{a_{i+1} - a_i\}, \tag{3.15}$$

де a_i – часові значення після їх приведення до єдиного числового формату.

Такий підхід має дві суттєві переваги. По-перше, він знижує чутливість до одиничних викидів і пропусків. По-друге, він дає змогу уніфікувати ряди, отримані з різних систем реєстрації, без прив'язки до конкретного способу кодування часу.

Після приведення часових значень до єдиного числового формату основною часовою шкалою аналізу приймається не штучно побудована рівномірна послідовність, а фактична відносна шкала часу:

$$\tau_i = t_i^{raw} - t_1^{raw},\ i = 1,...,N, \tag{3.16}$$

де t_i^{raw} – початкові часові мітки після їх уніфікації, а τ_i – фактичний відносний час спостереження від початку траєкторії. Медіанне значення:

$$\Delta t_{nom} = median\left(\tau_{i+1} - \tau_i\right) \tag{3.17}$$

використовується не для заміни реальної часової шкали, а як номінальний параметр дискретизації, необхідний для вибору довжини ковзного вікна, виявлення пропусків і контролю регулярності реєстрації.

Для обчислення похідних, зокрема кутової швидкості повороту, використовується фактичний часовий інтервал між спостереженнями:

$$ROT_i \approx \frac{COG_{i+1}^u - COG_{i-1}^u}{\tau_{i+1} - \tau_{i-1}}. \tag{3.18}$$

Такий підхід зберігає реальну часову динаміку руху судна та запобігає спотворенню похідних у разі нерівномірної дискретизації, пропусків або неоднакової частоти реєстрації.

Якщо для окремих процедур потрібне рівномірне подання, дискретизоване за часом, воно формується як додатковий регуляризований ряд:

$$\hat{z}\left(t_m\right) = I_{\text{int}}\left\{z\left(\tau_i\right)\right\},\ t_m = m\Delta t_{res}, \tag{3.19}$$

де $I_{\text{int}}\{\cdot\}$ – оператор інтерполяції, Δt_{res} – обраний крок регуляризації, а $\hat{z}\left(t_m\right)$ – значення відповідного сигналу на рівномірній сітці. У цьому випадку результати, отримані на регуляризованому ряді, мають супроводжуватися оцінюванням похибки інтерполяції та повторної дискретизації:

$$e_z = RMS\left(z\left(\tau_i\right) - \hat{z}\left(\tau_i\right)\right). \tag{3.20}$$

Отже, у запропонованій методиці розрізняються два рівні часової обробки: фактична шкала часу, яка використовується для збереження реальної динаміки руху, та регуляризована шкала, яка може застосовуватися лише як допоміжне подання за умови явного повторного переходу до дискретизації, інтерполяції та оцінки часової похибки такого переходу [25].

3.1.6. Побудова нормалізованого траєкторного ряду

На основі уніфікованих координат і часової осі формується нормалізований траєкторний ряд, який надалі є базою для всіх процедур фрактального аналізу.

3.1.6.1. Узагальнення координатного подання

Якщо вхідні дані задані в географічних координатах, після їх перетворення в метричну систему формується послідовність (x_i, y_i). Якщо ж у файлі відразу присутні метричні координати, їх використовують без додаткового перетворення. Таким чином, на виході етапу формується уніфікований метричний просторовий ряд:

$$\mathbf{R}_i = (x_i, y_i),\ i = 1,\ldots,N. \tag{3.21}$$

3.1.6.2. Оцінювання курсу судна

За наявності у вихідних даних поля курсу відповідні значення безпосередньо включаються до нормалізованої структури. Якщо ж курс у файлі відсутній, він обчислюється на основі похідних за координатами:

$$\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt},\ \dot{y}_i = \frac{dy_i}{dt},\ COG_i = \left(\frac{180}{\pi}\arctan 2\left(\dot{x}_i, \dot{y}_i\right) + 360\right) \bmod 360 \tag{3.22}$$

Таке подання дає змогу одержати узагальнений курс як кут напряму миттєвого вектора швидкості.

3.1.6.3. Розгортання курсу

Оскільки курс заданий на колі $0^\circ - 360^\circ$, під час його безпосереднього використання виникають стрибки поблизу межі циклічного розриву. Для усунення цього ефекту виконується розгортання кутової змінної (unwrap):

$$\mathrm{COG}_i^u = \mathrm{unwrap}\left(\mathrm{COG}_i\right), \tag{3.23}$$

де COG_i^u – розгорнутий курс. Це забезпечує коректність подальшого обчислення похідних та кутової швидкості повороту.

3.1.6.4. Кутова швидкість повороту

Кутова швидкість повороту судна визначається як числова похідна розгорнутого курсу за часом:

$$ROT_i \approx \frac{dCOG_i^u}{dt}. \tag{3.24}$$

У дискретному вигляді для внутрішніх точок ряду може бути використана центральна різниця:

$$ROT_i \approx \frac{COG_{i+1}^u - COG_{i-1}^u}{2\Delta t}. \tag{3.25}$$

Параметр ROT_i є похідним динамічним індикатором локальної інтенсивності маневрування, що обчислюється на основі змін розгорнутого курсу в часі [308]. Його використання у фрактальному аналізі та ризик-орієнтованому ранжуванні мікроепізодів потребує контролю часової дискретизації, розгортання курсу та впливу шуму на числову похідну.

3.1.6.5. Поперечне відхилення від згладженої траєкторії

Для кількісного опису локальних відхилень фактичної траєкторії від її згладженої форми вводиться поперечне відхилення XTE_i [354]. Спочатку будується згладжена траєкторія:

$$\tilde{x}_i = \mathrm{smooth}\left(x_i, \mathrm{win}\right),\ \tilde{y}_i = \mathrm{smooth}\left(y_i, \mathrm{win}\right), \tag{3.26}$$

де оператор smooth(·) реалізує згладжування ряду з вікном, довжина якого вибирається з урахуванням частоти дискретизації та необхідності зменшення шуму без надмірного згладжування локальних варіацій.

Оскільки значення XTE_i безпосередньо залежить від способу побудови згладженої траєкторії, оператор *smooth*(·) у даній методиці розглядається як параметризований оператор згладжування:

$$\mathbf{r}_i^{sm} = S_{w,\theta}\left(\mathbf{r}_i\right), \tag{3.27}$$

де $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)$ – фактична точка траєкторії, $\mathbf{r}_i^{sm} = \left(x_i^{sm}, y_i^{sm}\right)$ – відповідна точка згладженої траєкторії, w – довжина вікна згладжування, а θ – сукупність

параметрів фільтра.

Для забезпечення відтворюваності результатів у протоколі обробки фіксуються такі параметри: тип фільтра, довжина вікна w, спосіб обробки крайових точок, правило роботи з пропусками, одиниця вимірювання вікна та порядок застосування фільтра до координат x_i, y_i. Без фіксації цих параметрів значення XTE_i не може розглядатися як відтворюваний показник.

У загальному вигляді поперечне відхилення визначається не від довільної згладженої лінії, а від траєкторії, побудованої за зафіксованим протоколом згладжування: $XTE_i = \left(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^{sm}\right)^T \mathbf{n}_i$.

Для оцінювання стійкості результатів до вибору параметра w додатково виконується аналіз чутливості. Для набору допустимих значень $w \in W$ повторно обчислюються XTE_i, локальні фрактальні метрики та множина виділених епізодів. Якщо сукупність ключових епізодів, їх просторове положення та ранжування за індексом епізодної складності залишаються близькими для різних w, результати вважаються стійкими до параметра згладжування (табл. 3.3). Якщо ж зміна w істотно змінює кількість або локалізацію епізодів, такий результат має інтерпретуватися як параметрично нестійкий.

Таблиця 3.3. Протокол побудови згладженої траєкторії для розрахунку XTE

Параметр	Позначення	Зміст	Як фіксується в методиці
Тип фільтра	$\{S\}$	Алгоритм побудови згладженої траєкторії	Ковзне середнє
Довжина вікна	(w)	Кількість точок або часова тривалість згладжування	Фіксується в секундах або кількості спостережень
Крайові умови	–	Обробка початку та кінця траєкторії	Віддзеркалення, обрізання або локальне скорочення вікна
Пропуски даних	–	Реакція фільтра на пропущені значення	Попередня інтерполяція або виключення фрагментів
Чутливість	(W)	Набір альтернативних значень (w)	Використовується для перевірки стійкості епізодів

Далі обчислюються похідні згладженої траєкторії:

$$\dot{x}_i = \frac{d\dot{x}_i}{dt},\ \dot{y}_i = \frac{d\dot{y}_i}{dt}. \tag{3.28}$$

На їх основі формується дотичний одиничний вектор:

$$\mathbf{t}_i = \frac{1}{\sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \delta_0}} \left(\dot{x}_i, \dot{y}_i \right), \tag{3.29}$$

де $\delta_0 > 0$ – малий стабілізуючий доданок.

Орієнтований нормальний вектор задається як:

$$\mathbf{n}_i = \left(-t_i^y, t_i^x \right). \tag{3.30}$$

Вектор відхилення фактичної точки від згладженої траєкторії має вигляд:

$$\Delta\mathbf{r}_i = \left(x_i - \dot{x}_i, y_i - \dot{y}_i \right). \tag{3.31}$$

Тоді поперечне відхилення визначається як скалярний добуток:

$$\mathrm{XTE}_i = \left\langle \Delta\mathbf{r}_i, \mathbf{n}_i \right\rangle = \left(x_i - \dot{x}_i \right) n_i^x + \left(y_i - \dot{y}_i \right) n_i^y . \tag{3.32}$$

Саме ряд XTE_i надалі використовується як один із найбільш інформативних сигналів для фрактального аналізу локальної нерегулярності траєкторії судна, що також характеризує часові відхилення [291].

3.1.7. Формування нормалізованого табличного подання

Результатом етапу нормалізації є стандартизована таблиця траєкторії, яка для кожного рейсу містить такі базові поля:

$$\mathrm{norm} = \left[t_i, X_i, Y_i, \mathrm{COG}_i^u, \mathrm{ROT}_i\ \mathrm{XTE}_i \right]_{i=1}^{N}. \tag{3.33}$$

За потреби до цієї структури можуть додаватися початкові географічні координати (φ_i, λ_i), якщо вони необхідні для просторової візуалізації або зіставлення з картографічною основою.

На основі нормалізованої таблиці для кожного рейсу додатково формуються:

1. Зведення глобальних фрактальних характеристик;
2. Вибірка ковзних фрактальних вікон;
3. Службові індикатори якості даних та повноти покриття.

У результаті етап нормалізації завершується формуванням єдиного табличного подання, у якому різноформатні ІСНЗ-записи зведені до спільної

метричної та часової моделі. Саме це подання становить вихідну основу для наступного етапу – побудови системи фрактальних і динамічних показників.

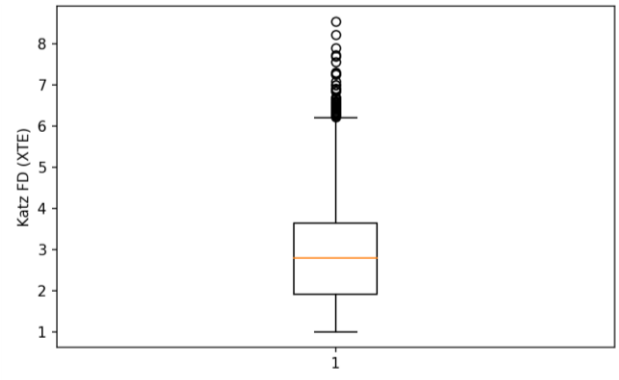
3.1.8. Проміжні результати етапу нормалізації та їх інтерпретація

Для перевірки коректності побудованого метричного подання доцільно розглянути характер розподілу окремих глобальних фрактальних показників, приклади локальних ковзних оцінок та структуру сформованого нормалізованого ряду.

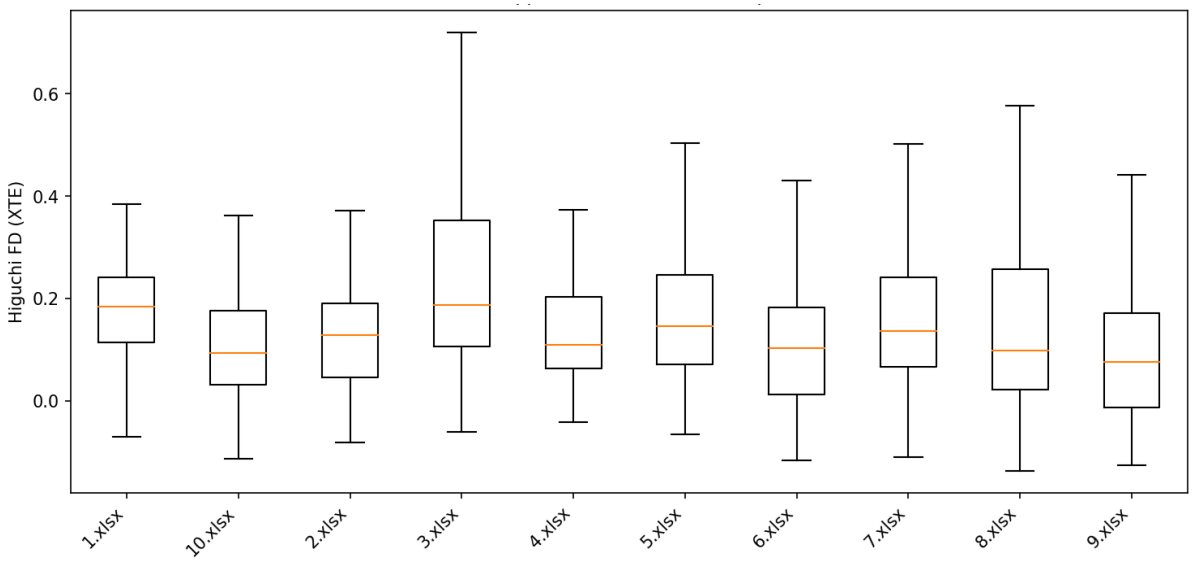
У подальших графічних матеріалах для подання результатів фрактального аналізу використано зведену оцінку фрактальної розмірності Higuchi: $H_H = D_H - 1$.

За стандартного діапазону $1 \leq D_H \leq 2$ показник H_H набуває значень від 0 до 1, де більші значення відповідають вищій локальній нерегулярності сигналу. Саме зведену оцінку H_H, а не абсолютне значення D_H, наведено на рисунках 3.1, 3.2, 3.4 і 3.7. Окремі незначні виходи за межі інтервалу [0;1] можуть виникати в коротких ковзних вікнах унаслідок скінченної довжини вибірки, шуму та похибки лінійної регресії. Тому від'ємні значення на рисунках не означають від'ємної фрактальної розмірності, а відображають похибку зведеної локальної оцінки.

На рисунку 3.1 наведено розподіл глобальної фрактальної метрики Katz FD для ряду поперечного відхилення XTE у сукупності нормалізованих траєкторій. Цей рисунок ілюструє, що після просторової та часової уніфікації фрактальні характеристики можуть бути зіставлені між різними рейсами в межах єдиного масштабу.



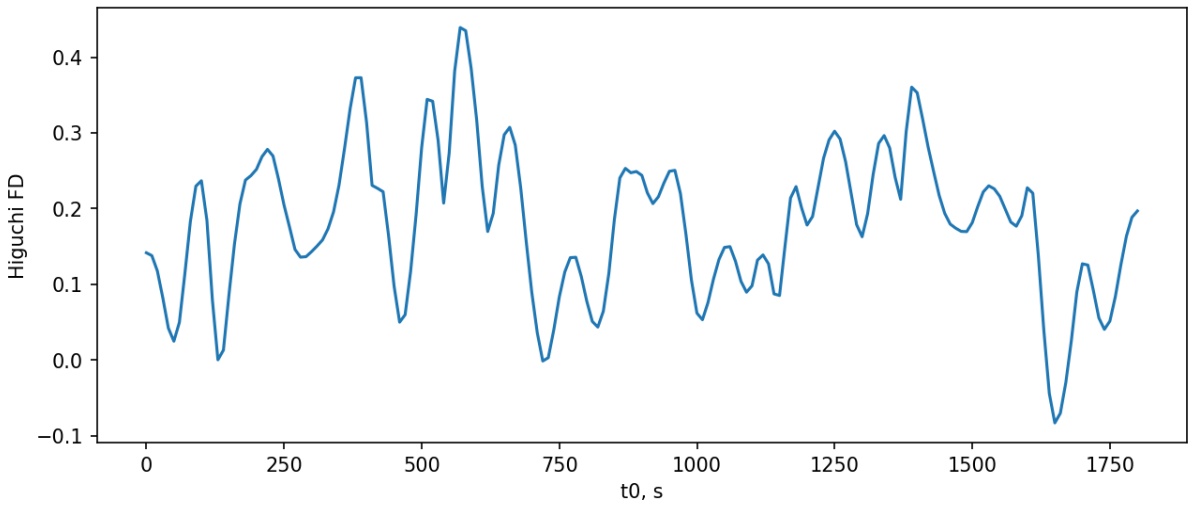
а



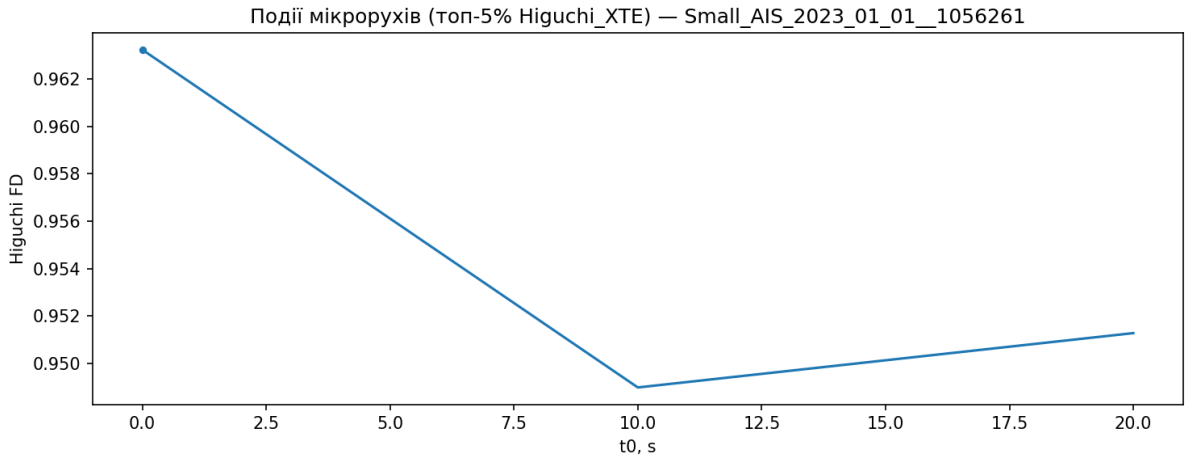
б

Рисунок 3.1. Глобальні фрактальні характеристики ряду XTE: *а* – розподіл Katz FD для сукупності нормалізованих траєкторій; *б* – розподіл Higuchi FD для окремих траєкторій

На рисунку 3.2 показано приклад локального ковзного оцінювання фрактальної розмірності Higuchi для ряду XTE у межах одного рейсу. Таке подання є принципово важливим, оскільки воно забезпечує перехід від глобального опису рейсу до аналізу локальних ділянок підвищеної мікроваріативності руху, які в подальшому інтерпретуються як кандидати на епізоди мікрорухів.



а



б

Рисунок 3.2. Приклад локального оцінювання Higuchi FD для ряду XTE: *а* – зміна локальної оцінки впродовж проходу; *б* – значення показника в межах виділеного епізоду підвищеної фрактальної активності

На рисунку 3.3 наведено фрагмент нормалізованого табличного подання траєкторії. Цей фрагмент ілюструє структуру множини $S^{(k)}$, яка використовується на наступних етапах фрактального аналізу, виділення мікроепізодів та формування сигнатури рейсу.

t_sec,X_m,Y_m,COG_deg_unwrapped,ROT_deg_s,XTE_m,track_id,LAT,LON
0.0,-6251106.648043936,14962179.355328359,143.2,-151.29999999999998,-49.371851590281686,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13108,-92.0399
1.0,-6251067.211789579,14962155.919711936,-8.100000000000005,-63.39999999999999,-75.47948762222903,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13132,-92.04
2.0,-6251059.646246241,14962161.973630074,16.4,2.400000000000003,-56.91334604243369,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13132,-92.04006
3.0,-6251012.099485618,14962133.571713166,-3.2999999999999985,72.05,-4.477754882108555,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13161,-92.04018
4.0,-6251000.206026463,14962131.632207153,160.5,26.049999999999997,-10.482993175447193,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13166,-92.04023
5.0,-6250959.911543719,14962122.632034099,48.8,-66.65,9.502838851273257,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13184,-92.04039
6.0,-6250967.44970974,14962137.221842099,27.2,-34.74999999999999,19.54728606345549,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13175,-92.04041
7.0,-6250988.285314222,14962150.336403152,-20.699999999999985,-36.199999999999996,-2.6572806981832384,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13162,-92.04036
8.0,-6250970.803030606,14962141.412471302,-45.19999999999999,2.2500000000000124,10.10759448857473,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13172,-92.04041
9.0,-6250962.69235452,14962136.446030851,-16.19999999999996,24.949999999999996,25.83208278487004,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13177,-92.04043
10.0,-6250984.100478746,14962139.937179912,4.7,6.399999999999984,0.3533776485144715,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13168,-92.04034
11.0,-6250970.400904543,14962127.986360135,-3.399999999999992,-7.349999999999994,16.125727717758537,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13178,-92.04036
12.0,-6250958.507517051,14962126.046847783,-9.99999999999999,-4.0500000000000025,32.47212346091766,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13183,-92.04041
13.0,-6250960.456808338,14962133.65228146,-11.499999999999996,-3.050000000000013,26.58281601655823,Small_AIS_2023_01_01__3791472,26.13179,-92.04043

Рисунок 3.3. Фрагмент нормалізованої таблиці траєкторії руху судна

Наведені приклади ілюструють коректність логіки етапу нормалізації та демонструють структуру даних, яка надалі використовується для фрактального аналізу, виділення мікроепізодів і формування сигнатури рейсу. Повна експериментальна перевірка працездатності цієї послідовності обробки на великому масиві AIS/ECDIS-проходів наведена у розділі 6.

3.2. Формування системи фрактальних та динамічних показників у ковзних вікнах

Після етапу нормалізації, на якому сформовано ряди t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i, наступним кроком є побудова системи фрактальних і динамічних показників, що кількісно описують геометрію, нерегулярність та структуру, залежну від масштабу руху судна.

У запропонованому підході такі показники обчислюються на двох рівнях:

1. глобально – для всього рейсу;
2. локально – у ковзних часових вікнах.

Саме локальні ковзні оцінки надалі використовуються для виявлення епізодів мікрорухів, їх фрактального кодування та визначення ризик-орієнтованого індексу епізодної складності. Завдяки цьому забезпечується перехід від інтегрального опису траєкторії до аналізу її локальної мікродинамічної структури [36, 45, 326].

3.2.1. Модель ковзних вікон

Нехай після нормалізації маємо часово впорядковані ряди, задані на фактичній відносній шкалі часу:

$$\begin{gathered}\mathbf{X}=\{X_i\}_{i=1}^{N},\ \mathbf{Y}=\{Y_i\}_{i=1}^{N},\\ \mathbf{XTE}=\{\mathrm{XTE}_i\}_{i=1}^{N},\ \theta_{COG}=\{\mathrm{COG}_i\}_{i=1}^{N},\ \omega=\{\mathrm{ROT}_i\}_{i=1}^{N},\end{gathered}\tag{3.34}$$

де $t_i = (i - 1)\Delta t = \tau_i$ – час у секундах, а τ_i фактичний відносний час спостереження, а Δt – крок дискретизації, отриманий на попередньому етапі.

Для локального аналізу вводиться ковзне часове вікно тривалості T_w і крок його зміщення T_s. Якщо траєкторія має рівномірну або попередньо регуляризовану часову сітку, індексні параметри вікна можуть бути оцінені через номінальний крок Δt_{med}:

$$f_s=\frac{1}{\Delta t},\ L_w=\lfloor T_w f_s \rfloor,\ S_w=\lfloor T_s f_s \rfloor.\tag{3.35}$$

У подальших обчисленнях приймаються такі параметри: $T_w = 120$ с, $T_s = 10$ с. Значення $T_w = 120$ с і $T_s = 10$ с у даній реалізації розглядаються як базова конфігурація ковзного аналізу, відносно якої виконується подальша перевірка

параметричної чутливості. Параметр T_w визначає часовий масштаб локального фрагмента, у межах якого обчислюються фрактальні показники, тоді як T_s визначає щільність перекриття сусідніх вікон і, відповідно, деталізацію часової локалізації епізодів.

Для контролю впливу цих параметрів вводиться сітка допустимих конфігурацій:

$$\Theta_W = \left\{ \left(T_w, T_s\right) : T_w \in W_T, T_s \in W_S, T_s < T_w \right\}, \tag{3.36}$$

де W_T – множина перевірених тривалостей вікна, а W_S – множина перевірених кроків зміщення. Для кожної конфігурації (T_w, T_s) повторно обчислюються локальні фрактальні показники, множина активних вікон, кількість епізодів, їх тривалість і просторове положення пікових точок.

Базова конфігурація вважається методично прийнятною лише за умови, що зміна параметрів у допустимому діапазоні не призводить до принципової зміни просторово-часової структури основних епізодів (табл. 3.4). Якщо кількість, локалізація або ранжування епізодів істотно змінюються, відповідні результати мають розглядатися як параметрично нестійкі й потребують окремої інтерпретації.

Таблиця 3.4. Параметри ковзного вікна та їх вплив на результати фрактально-епізодного аналізу

Параметр	Що визначає	Потенційний вплив	Спосіб контролю
T_w	Тривалість локального фрагмента аналізу	Занадто мале вікно підсилює шум; занадто велике може згладжувати мікрокорекції	Аналіз чутливості за множиною (W_T)
T_s	Крок зміщення вікна	Визначає щільність перекриття та точність локалізації епізодів	Аналіз чутливості за множиною (W_S)
T_s/T_w	Ступінь перекриття	Впливає на кількість активних вікон і зшивання епізодів	Порівняння кількості епізодів і положення піків
Кількість вікон	Обсяг локального аналізу	Впливає на стабільність статистик	Контроль мінімального покриття треку

Тоді j-те вікно аналізу доцільно задавати насамперед як часовий інтервал:

$$W_j = \{i_j, \ldots, i_j + L_w - 1\},\ i_j = 1 + (j-1)S_w. \tag{3.37}$$

Кожне таке вікно розглядається як локальний фрагмент траєкторії, для якого надалі обчислюють фрактальні та динамічні показники. Саме послідовність значень, отриманих на множині вікон W_j, утворює основу для виявлення ділянок підвищеної мікроваріативності руху, агрегації епізодів мікрорухів і формування фрактальної сигнатури рейсу.

3.2.2. Локальні фрагменти сигналів у ковзних вікнах

Для кожного вікна W_j, визначеного індексним інтервалом I_j, виділяються локальні фрагменти сигналів:

$$I_j = \{n_j, n_j+1, \ldots, n_j + L_w - 1\},\ n_j = 1+(j-1)S_w, \tag{3.38}$$

виділяються локальні фрагменти сигналів, що надалі слугують основою для обчислення фрактальних і динамічних показників:

$$\mathbf{x}^j = \left\{\mathrm{XTE}_i \mid i \in I_j\right\},\ \boldsymbol{\omega}^j = \left\{\mathrm{ROT}_i \mid i \in I_j\right\},\ \mathbf{r}^j = \left\{\left(X_i, Y_i\right) \mid i \in I_j\right\}. \tag{3.39}$$

У даній методиці використовується квантильний детектор, орієнтований на *XTE* локальної фрактальної активності. Це означає, що первинне виявлення локально активних фрагментів виконується за фрактальними характеристиками ряду поперечного відхилення XTE_i, оскільки саме цей ряд безпосередньо відображає відхилення фактичної траєкторії від її локально згладженої траєкторії та є чутливим до надлишкових поперечних мікрокорекцій.

Водночас така схема не ототожнюється з повним багатоканальним описом руху судна. Показники COG_i, ROT_i, кривизни траєкторії та швидкості руху розглядаються як додаткові динамічні й геометричні канали, які можуть використовуватися для перевірки, інтерпретації та уточнення епізодів, виділених за показником *XTE*. Тому результати локального детектування в цьому підрозділі слід розглядати як оцінку мікроваріативності поперечних відхилень траєкторії, а не як універсальну багатоканальну процедуру виявлення всіх можливих режимів маневрування.

Для розширення методики до багатоканального варіанта може бути введений вектор локальних ознак:

$$\mathbf{q}_j = \left[H_{XTE,j}, H_{ROT,j}, H_{COG,j}, H_{k,j}, H_{V,j}\right] \tag{3.40}$$

де $H_{XTE,j}$, $H_{ROT,j}$, $H_{COG,j}$, $H_{к,j}$, $H_{V,j}$ – локальні фрактальні або динамічні оцінки відповідно для поперечного відхилення, кутової швидкості повороту, курсу, кривизни та швидкості. У цьому випадку індикатор активності вікна може визначатися не лише порогом для *XTE*, а інтегральним критерієм:

$$A_j = I\left(\sum_m \alpha_m \tilde{q}_{m,j} \geq T_q \right), \tag{3.41}$$

де $\tilde{q}_{m,j}$ – нормовані компоненти багатоканального вектора, α_m – вагові коефіцієнти каналів, T_q – поріг локальної активності. У межах цього розділу основною реалізацією є XTE-орієнтований варіант, а багатоканальна схема розглядається як методичне узагальнення для подальшої валідації.

У результаті ковзне вікно в даному дослідженні інтерпретується як обмежений у часі фрагмент траєкторії, у межах якого обчислюються фрактальні та динамічні показники (табл. 3.5). При цьому не висувається вимога суворої стаціонарності сигналу, а отримані оцінки розглядаються як локальні індикатори масштабної нерегулярності руху в межах заданого інтервалу спостереження [31].

Таблиця 3.5. Методичні обмеження та контроль відтворюваності локального фрактального аналізу

Методичний елемент	Потенційна проблема	Як враховано в методиці
Часова шкала	Медіанний крок може спотворити реальну динаміку	Реальні часові мітки зберігаються як основна шкала; медіанний крок використовується лише як номінальний параметр
Ресемплінг	Інтерполяція може змінити похідні та фрактальні оцінки	Регуляризований ряд використовується лише за потреби і супроводжується оцінкою похибки
XTE	Значення залежить від згладжування	Тип фільтра, вікно, крайові умови та чутливість до *w* фіксуються в протоколі
Одноканальність	Детектор епізодів може бути надмірно залежним від XTE	XTE визначається як основний канал локального детектування; COG, ROT, кривизна та швидкість розглядаються як додаткові канали інтерпретації
Квазістаціонарність	Немає статистичної перевірки стаціонарності вікна	Твердження про квазістаціонарність вилучається; вікно трактується як локальний інтервал аналізу

3.2.3. Фрактальна розмірність Higuchi для скалярних рядів

Одним із базових показників локальної нерегулярності траєкторного сигналу є фрактальна розмірність Higuchi [327]. Для дискретного скалярного ряду $\{x_i\}_{i=0}^{N-1}(\mathrm{COG},\mathrm{ROT},\mathrm{XTE})$ для кожного масштабу $k=2,\ldots,k_{\max}$ формуються k підпослідовностей $X_m^k=\{x_m, x_{m+k}, x_{m+2k},\ldots\}$, $m=0,1,\ldots,k-1$.

Для кожної такої підпослідовності оцінюється довжина ламаної:

$$L_m(k)=\frac{N-1}{\left\lfloor\frac{N-m-1}{k}\right\rfloor k}\sum_{j=1}^{\left\lfloor\frac{N-m-1}{k}\right\rfloor}\left|x_{m+jk}-x_{m+(j-1)k}\right|. \tag{3.42}$$

Середня довжина для масштабу k визначається як:

$$L(k)=\frac{1}{|\mathcal{M}_k|}\sum_{m\in\mathcal{M}_k}L_m(k), \tag{3.43}$$

де $\mathcal{M}_k$ – множина індексів, для яких підпослідовність містить достатню кількість елементів.

За наявності фрактальної структури ряду виконується степенева залежність:

$$L(k)\sim Ck^{-D_H},$$

або в логарифмічному масштабі:

$$\ln L(k)\approx \ln C - D_H \ln k. \tag{3.44}$$

Тоді оцінка фрактальної розмірності Higuchi визначається як модуль кутового коефіцієнта лінійної регресії в координатах ($\ln k$, $\ln L(k)$):

$$D_H=-\hat{\beta}_1,\ \hat{\beta}_1=\arg\min_{\beta_0,\beta_1}\sum_k\left(\ln L(k)-\beta_0-\beta_1\ln k\right)^2. \tag{3.45}$$

У межах цього дослідження фрактальна розмірність Higuchi використовується:

– глобально – для рядів COG, ROT, XTE;

– локально в ковзних вікнах – для ряду XTE.

Відповідно глобальні оцінки мають вигляд:

$$D_H^{\mathrm{COG}},\ D_H^{\mathrm{ROT}},\ D_H^{\mathrm{XTE}}, \tag{3.46}$$

а для j-го ковзного вікна:

$$D_{H,j}^{\mathrm{XTE}} = D_H\left(\mathbf{x}^j\right). \tag{3.47}$$

Змістовно цей показник відображає ступінь локальної геометричної складності ряду: чим вищим є значення фрактальної розмірності Higuchi - D_H, тим більш «ламаним», нерегулярним і таким, що має вищу локальну нерегулярність, є сигнал. Саме тому він використовується як базовий індикатор для виявлення епізодів мікрорухів.

3.2.4. Метод Detrended Fluctuation Analysis для масштабованих флуктуацій

Для аналізу масштабованих флуктуацій у рядах курсу, кутової швидкості повороту та поперечного відхилення використовується метод DFA (Detrended Fluctuation Analysis). Нехай маємо дискретний ряд $\{x_i\}_{i=1}^{N}$.

Спочатку будується інтегральний профіль:

$$y(j) = \sum_{i=1}^{j}(x_i - \bar{x}),\ j = 1,\ldots,N, \tag{3.48}$$

де $\bar{x}$ – середнє значення ряду.

Далі для кожного масштабу s профіль $y(j)$ розбивається на $n_s = \lfloor N/s \rfloor$ неперекривних відрізків довжини s. У кожному відрізку виконується локальна лінійна апроксимація:

$$y(j) \approx a_v j + b_v,\ j \in \left[(v-1)s+1, vs\right], \tag{3.49}$$

після чого обчислюються залишкові відхилення:

$$\varepsilon_v(j) = y(j) - (a_v j + b_v). \tag{3.50}$$

Середньоквадратичне відхилення для масштабу s визначається як:

$$F^2(s) = \frac{1}{n_s s}\sum_{v=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{s}\varepsilon_v(j)^2. \tag{3.51}$$

За наявності самоподібної структури виконується співвідношення $F(s) \sim s^{\alpha}$, а в логарифмічному масштабі: $\ln F(s) \sim \alpha \ln s + \text{const}$.

Параметр α є оцінкою масштабної кореляційної структури ряду. У роботі розглядаються глобальні значення: α^{COG}, α^{ROT}, α^{XTE}, а також локальні ковзні оцінки для ряду XTE:

$$\alpha_j^{\mathrm{XTE}} = DFA\left(\mathbf{x}^j\right). \tag{3.52}$$

На відміну від фрактальної розмірності Higuchi, яка більш чутлива до геометричної «ламаності» сигналу, DFA дає змогу оцінити довготривалі кореляції та масштабну поведінку флуктуацій. Тому її включення до системи показників робить опис мікроваріативності руху більш структурно повним.

3.2.5. Фрактальна розмірність за Katz

Ще одним класичним індикатором складності траєкторного сигналу є фрактальна розмірність за Katz [328]. Для ряду $\{x_i\}_{i=1}^{N}$ спочатку обчислюється сумарна довжина траєкторії у відповідному просторі сигналу:

$$L = \sum_{i=2}^{N} \left| x_i - x_{i-1} \right|. \tag{3.53}$$

Далі визначається максимальна відстань від початкової точки до будь-якої іншої точки ряду: $d = \max\limits_{1 \le i \le N} \left| x_i - x_1 \right|$.

Тоді фрактальна розмірність за Katz задається співвідношенням.

$$D_K = \frac{\log_{10}\left(N\right)}{\log_{10}\left(N\right) + \log_{10}\left(\dfrac{d}{L}\right)}. \tag{3.54}$$

Якщо $L = 0$ або $d = 0$, то показник втрачає змістовну інформативність як міра складності, тому в таких випадках застосовується вироджене значення, що відокремлює тривіальні сигнали від реально варіативних фрагментів.

У дослідженні показник Katz використовується:

– глобально – для рядів COG, ROT, XTE;

– локально в ковзних вікнах – для ряду XTE:

$$D_K^{\mathrm{COG}},\ D_K^{\mathrm{ROT}},\ D_K^{\mathrm{XTE}}, \tag{3.55}$$

$$D_{K,j}^{\mathrm{XTE}} = D_K\left(\mathbf{x}^j\right). \tag{3.56}$$

Показник Katz є чутливим до «ламаності» та локальної зигзагоподібності сигналу всередині вікна, тому разом із метриками Higuchi і DFA він формує багатовимірний опис фрактальної сигнатури мікрорухів.

3.2.6. Додаткові фрактальні та динамічні характеристики

Окрім базових метрик Higuchi, DFA та Katz, до системи показників включено також фрактальну розмірність Petrosian [329]. Для ряду довжини N вона визначається як:

$$D_P = \frac{\log_{10}(N)}{\log_{10}(N) + \log_{10}\left(\frac{N}{N + 0{,}4N_\delta}\right)}, \tag{3.57}$$

де N_δ – кількість змін знака першої різниці $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$.

Цей показник використовується як швидкий додатковий індикатор нерегулярності для рядів COG, ROT і XTE. На відміну від попередніх метрик, він менш чутливий до дрібних амплітудних флуктуацій, але добре відображає загальну частоту змін знака першої різниці сигналу [29].

Поряд із фрактальними індикаторами до системи ознак включаються також динамічні характеристики керування, пов’язані з кутовою швидкістю повороту ROT. У цьому розділі ROT розглядається як похідний динамічний сигнал, чутливий до часової дискретизації, розгортання курсу та шуму вимірювань. Його статистичні характеристики в межах виділених епізодів використовуються для допоміжного опису інтенсивності та варіабельності маневрування за умови попереднього контролю чисельної стійкості.

Таким чином, сформована система показників поєднує два взаємодоповнювальні типи характеристик:

1. Фрактальні показники, що описують геометричну складність сигналів XTE, COG, ROT;

2. Динамічні показники, що описують інтенсивність керувальних поворотів та варіабельність керування.

3.2.7. Фрактальна розмірність просторового шляху судна

Для просторового шляху судна $r = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$ використовується метод підрахунку комірок для оцінювання фрактальної розмірності [330]. Спочатку визначається мінімальний квадрат, який містить траєкторію:

$$x_{\min} = \min_i x_i,\ x_{\max} = \max_i x_i,\ y_{\min} = \min_i y_i,\ y_{\max} = \max_i y_i,$$
$$L_b = \max\left(x_{\max} - x_{\min},\ y_{\max} - y_{\min}\right). \tag{3.58}$$

Далі задається набір масштабів.

$$E_j = L_b/2^{\,j},\ j = 1,\ldots, J\,.$$

Для кожного масштабу площина розбивається на квадратну сітку з кроком ε_j, після чого виконується квантування точок траєкторії:

$$\xi_i = \left\lfloor \frac{X_i - x_{\min}}{\varepsilon_j} \right\rfloor,\ \eta_i = \left\lfloor \frac{Y_i - y_{\min}}{\varepsilon_j} \right\rfloor. \tag{3.59}$$

Число заповнених комірок при цьому дорівнює:

$$N\left(\varepsilon_j\right) = \left|\left\{\left(\xi_i, \eta_i\right)\right\}\right|. \tag{3.60}$$

У вибраному масштабному діапазоні припускається залежність:

$$N\left(\varepsilon\right) \sim \varepsilon^{-D_B}, \tag{3.61}$$

або еквівалентно $\ln N\left(\varepsilon\right) \approx D_B \ln\dfrac{1}{\varepsilon} + \text{const}$.

Відповідно, розмірність просторового шляху за методом підрахунку комірок визначається $D_B = \hat{\beta}$,

де $\hat{\beta}$ – оцінка кутового коефіцієнта лінійної регресії в координатах.

Змістовно показник D_B характеризує просторову звивистість і наявність петлеподібних фрагментів шляху. Значення, близькі до 1, відповідають майже прямолінійній траєкторії, тоді як зростання D_B свідчить про ускладнення геометрії шляху, наявність петлеподібних фрагментів, повторних корекцій і просторової нерегулярності руху.

3.2.8. Інтегрована система показників рейсу

На основі попередніх співвідношень для кожного рейсу формується дворівнева система показників.

Перший шар утворюють глобальні фрактальні індикатори проходу [239, 274]. Отриманий вектор надалі може використовуватися для порівняння, класифікації та виявлення нетипових траєкторних реалізацій [282]:

$$\mathbf{G}_f = \begin{pmatrix} D_H^{COG}, D_H^{ROT}, D_H^{XTE}, \alpha^{COG}, \alpha^{ROT}, \alpha^{XTE}, \\ D_K^{COG}, D_K^{ROT}, D_K^{XTE}, D_P^{COG}, D_P^{ROT}, D_P^{XTE}, D_B \end{pmatrix} \tag{3.62}$$

Саме вектор $\mathbf{G}_f$ задає узагальнену фрактальну сигнатуру рейсу на глобальному рівні.

Другий шар утворює поле локальних ковзних показників

$$\mathbf{W}_f = \left\{ \left(t_{f,j}^{(0)}, D_{H,j}^{XTE}, \alpha_j^{XTE}, D_{K,j}^{XTE} \right) \right\}_{j=1}^{N_f}, \tag{3.63}$$

де $t_{f,j}^{(0)}$ – час початку j-го ковзного вікна для файлу f.

Саме поле $\mathbf{W}_f$ відображає часову структуру локальної фрактальної активності вздовж траєкторії і в подальшому використовується для виявлення епізодів мікрорухів [274]. Для ілюстрації отриманого простору локальних фрактальних показників наведемо розподіл ковзних значень Higuchi FD для ряду XTE для сукупності траєкторій.

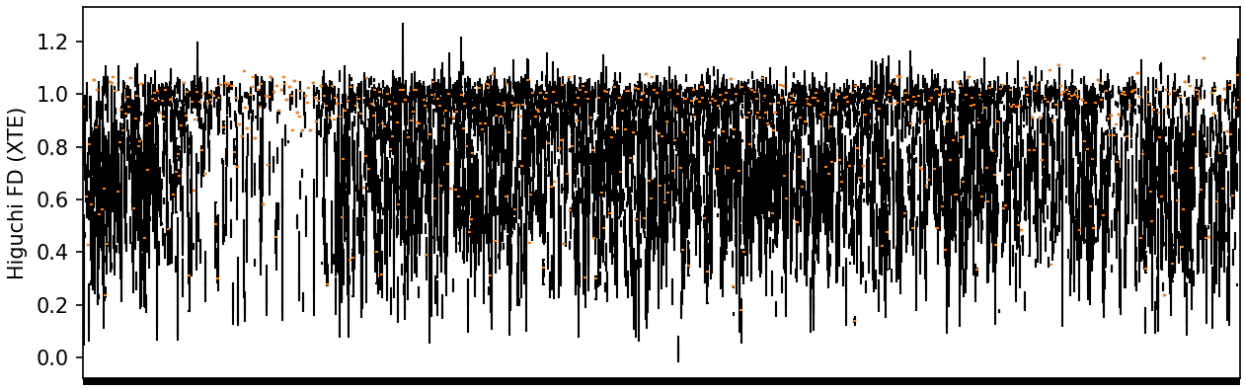


Рисунок 3.4. Розподіл ковзних значень Higuchi FD для ряду XTE по сукупності траєкторій

Рисунок 3.4 відображає варіативність локальної фрактальної активності у вікнах спостереження та свідчить про те, що навіть після загальної нормалізації структура мікроваріативності руху істотно відрізняється між рейсами, що створює підстави для подальшого епізодного аналізу.

Для оцінювання взаємозв’язків між глобальними фрактальними показниками розглянемо їх кореляційну матрицю.

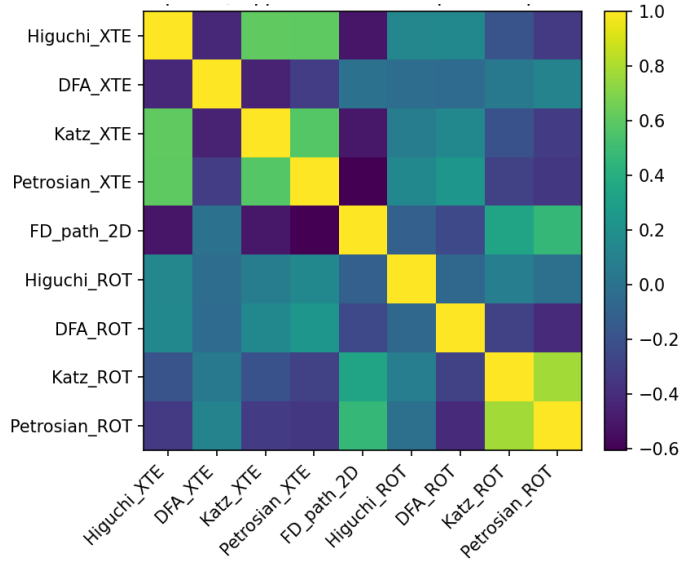


Рисунок 3.5. Кореляційна матриця глобальних фрактальних показників рейсу

Рисунок 3.5 демонструє, що окремі фрактальні індикатори не є взаємозамінними: між показниками наявні додатні й від'ємні кореляційні зв'язки різної сили, що свідчить про доцільність попереднього багатопоказникового опису траєкторії та свідчить, що зведення аналізу до одного скалярного показника може призвести до втрати частини інформації.

Це дає змогу зробити висновок, що формалізовані визначення та побудована система показників створюють завершену основу для переходу до наступного етапу дослідження – виявлення та агрегації епізодів мікрорухів на основі поля локальних фрактальних ознак.

3.3. Метод виявлення та агрегації епізодів мікрорухів за квантильними порогами фрактальних показників

Після формування ковзних фрактальних метрик кожна траєкторія описується часовим полем локальних значень, які можуть бути використані для виділення ділянок підвищеної мікроваріативності руху. Формально для рейсу f це поле можна записати як:

$$\mathbf{W}_f = \left\{ \left(t_{f,i}^{(0)}, H_{f,i}, \ldots \right) \right\}_{j=1}^{N_f}, \tag{3.64}$$

де $t_{f,i}^{(0)}$ – час початку j-го ковзного вікна; $H_{f,i}$ – значення фрактальної розмірності Higuchi для ряду XTE у цьому вікні.

У подальшому саме послідовність $\{H_{f,j}\}$ використовується як базовий фрактальний індикатор локальної мікроваріативності траєкторії руху судна. Завданням даного етапу є перетворення множини окремих високих значень $\{H_{f,j}\}$ на кінцеву множину епізодів мікрорухів з чіткими просторово-часовими та динамічними характеристиками.

3.3.1. Квантильна фільтрація фрактальних вікон

Нехай для рейсу f маємо множину допустимих значень Higuchi FD:

$$\mathcal{H}_f = \{H_{f,j} \mid j=1,\ldots,N_f,\ H_{f,j} \text{ не є NaN}\}. \quad (3.65)$$

Для виділення вікон з підвищеною фрактальною активністю вводиться квантильний поріг $Q \in (0,1)$. У даному дослідженні приймається $Q = 0{,}95$, що відповідає приблизно 5 % вікон із найбільшими значеннями фрактального показника. Індивідуальний квантильний поріг $Q = 0{,}95$ виділяє приблизно 5 % вікон із найбільшими значеннями фрактального показника в межах кожного рейсу. Тому такі вікна інтерпретуються як відносно фрактально активні фрагменти, а сформовані з них епізоди – як епізоди підвищеної фрактальної активності. Перехід до абсолютного критерію аномальності або небезпечності передбачає використання глобального каліброваного порога, експертної розмітки [47, 289, 297] (табл. 3.6).

Таблиця 3.6. Режими порогової детекції локальної фрактальної активності

Режим	Поріг	Що виявляє	Що не доводить
Індивідуальний квантильний	$T_f = Quantile_Q(\mathcal{H}_f)$	Найбільш нерегулярні фрагменти всередині одного рейсу	Наявність абсолютної аномалії
Глобальний квантильний	$T_{glob} = Quantile_Q(\mathcal{H}_{all})$	Фрагменти, що перевищують загальний рівень по сукупності даних	Причину нерегулярності
Калібрований	T_{cal}, визначений за розміченими даними	Відхилення від експертно-заданого режиму	Поведінкову причину без зовнішніх змінних
Експертно-валідований	Поріг та експертна розмітка	Потенційно ризикові або складні епізоди	Автоматичну ідентифікацію дій оператора

Поріг може визначатися у двох режимах.

У першому режимі поріг задається індивідуально для кожного рейсу:

$$T_f = \text{Quantile}_Q(\mathcal{H}_f). \tag{3.66}$$

У другому режимі поріг формується глобально для всієї сукупності даних:

$$\mathcal{H}_{\text{all}} = \bigcup_f \mathcal{H}_f,\ T_{\text{glob}} = \text{Quantile}_Q\left(\mathcal{H}_{\text{all}}\right),\ T_f \equiv T_{\text{glob}} \forall f\ . \tag{3.67}$$

Після цього для кожного вікна формується індикатор фрактально активного стану: $I_{f,j} = \begin{cases} 1,\ H_{f,j} \geq T_f, \\ 0,\ H_{f,j} < T_f. \end{cases}$ (3.68)

Таким чином, ковзні вікна з I_{fj} =1 утворюють множину «прапорних» вікон, які інтерпретуються як первинні кандидати на належність до епізодів мікрорухів.

Квантильна фільтрація є принципово важливою, оскільки вона робить процедуру інваріантною до абсолютного масштабу значень і дає змогу виділяти саме відносно найбільш нерегулярні небезпечні ділянки траєкторії [109].

3.3.2. Інтервальне подання вікна та умова зшивання

Кожне прапорне ковзне вікно для рейсу f інтерпретується як часовий інтервал $W_{f,j} = \left[t_{f,j}^{(0)},\ t_{f,j}^{(0)} + T_w \right]$.

Для кожного рейсу всі прапорні вікна впорядковуються за часом початку:

$$\left\{ W_{f,j} \right\}_{j \in \mathcal{F}_f} \xrightarrow{\text{sort}} \left\{ W_{f,(1)}, W_{f,(2)}, ..., W_{f,(M_f)} \right\}, \tag{3.69}$$

де $t_{f,(1)}^{(0)} \leq t_{f,(2)}^{(0)} \leq ... \leq t_{f,(M_f)}^{(0)}$.

Для зшивання сусідніх вікон в єдиний епізод вводиться параметр максимально допустимого розриву Δ_{gap}. Два сусідніх інтервали $W_{f,(m)}$ та $W_{f,(m+1)}$ вважаються належними до одного епізоду, якщо виконується умова:

$$t_{f,(m+1)}^{(0)} \leq t_{f,(m)}^{(0)} + T_w + \Delta_{\text{gap}}. \tag{3.70}$$

За цієї умови нове фрактально активне вікно приєднується до поточного епізоду, якщо воно починається не пізніше ніж через Δ_{gap} секунд після

завершення попереднього активного вікна. Якщо ця умова не виконується, починається новий епізод.

Звідси випливає, що епізод мікроруху визначається за параметризованою процедурою агрегації як максимальний часовий інтервал за відношенням включення, що утворюється об'єднанням послідовних фрактально активних ковзних вікон за умови допустимого розриву між ними.

3.3.3. Обмеження на мінімальну тривалість епізоду

Для відсікання випадкових одиничних сплесків фрактальної активності вводиться мінімальна тривалість епізоду $T_{min} > 0$.

У цьому дослідженні як базову конфігурацію використано $T_{min} = 30$ с. Вплив цього параметра на кількість, тривалість і просторову локалізацію епізодів перевіряється в межах процедури параметричної чутливості.

Нехай для епізоду-кандидата ε початок і кінець визначені як $(t_{\text{start}}, t_{\text{end}})$. Тоді його тривалість дорівнює: $D(\varepsilon) = t_{\text{end}} - t_{\text{start}}$.

Епізод допускається до подальшого аналізу, якщо виконується умова:

$$D_{(\varepsilon)} \geq T_{\min}. \tag{3.71}$$

У результаті цього формується кінцева множина епізодів мікрорухів для рейсу *f*:

$$\mathcal{E}_f = \left\{ \varepsilon_{f,i} = \left(t_{f,i}^{\text{start}}, t_{f,i}^{\text{end}}, \mathcal{B}_{f,i} \right) \right\}_{i=1}^{E_f}, \tag{3.72}$$

де $\mathcal{B}_{f,i}$ – підмножина ковзних вікон, що увійшли до складу *i*-го епізоду.

На цій основі епізод мікроруху розглядається як блок локальної фрактальної активності, зв'язний у часі відповідно до заданого максимально допустимого розриву між активними вікнами, що асоціюється із проявами людського фактора операторів [82, 288].

3.3.3.1. Параметрична чутливість процедури агрегації епізодів

Параметри Δgap і T_{min} не є нейтральними технічними величинами, оскільки вони безпосередньо визначають межі епізодів, їх кількість, сумарну тривалість і просторову локалізацію. Тому процедура агрегації активних вікон розглядається як параметризований етап моделі:

$$\mathcal{E}_f \left(\Delta gap, T_{\min} \right) = \mathcal{A} \left(I_{f,j}, T_w, \Delta gap, T_{\min} \right), \tag{3.73}$$

де $\mathcal{E}(\cdot)$ – оператор об'єднання активних вікон у часово зв'язані епізоди.

Для контролю стійкості результатів виконується порівняння множин епізодів, отриманих за різних значень Δgap і T_{min}. Для кожної конфігурації оцінюються:

$$\begin{aligned} &N_E\left(\Delta gap, T_{\min}\right), \\ &D_{med}\left(\Delta gap, T_{\min}\right), \\ &L_{peak}\left(\Delta gap, T_{\min}\right), \end{aligned} \tag{3.74}$$

де N_E – кількість виділених епізодів, D_{med} – медіанна тривалість епізоду, L_{peak} – множина просторових положень пікових точок епізодів.

Якщо при помірній зміні Δgap і T_{min} зберігаються основні зони просторової концентрації пікових точок та відносне ранжування епізодів з найбільшим індексом складності, результат вважається стійким (табл. 3.7). Якщо ж кількість епізодів або їх просторова локалізація істотно змінюються, це свідчить про параметричну залежність висновків і це слід окремо зазначити під час подання результатів.

Таблиця 3.7. Контроль впливу параметрів агрегації на структуру епізодів

Параметр	Зміст	Очікуваний вплив	Контрольований результат
Δgap	Максимально допустимий розрив між активними вікнами	Зі збільшенням параметра окремі епізоди можуть зливатися	Кількість епізодів, сумарна тривалість, межі епізодів
T_{min}	Мінімальна тривалість епізоду	Зі збільшенням параметра короткі епізоди відсікаються	Кількість епізодів, частка коротких фрагментів
T_w	Тривалість ковзного вікна	Визначає часовий масштаб локальної фрактальної оцінки	Стабільність пікових зон
Q	Квантильний поріг	Визначає частку активних вікон	Чутливість до рівня фрактальної активності

3.3.4. Просторово-часові характеристики епізоду

Для кожного епізоду $\varepsilon_{f,i}$ визначаються часові, фрактальні, просторові та динамічні характеристики.

3.3.4.1. Часові параметри

Основними часовими параметрами епізоду є:

–початок $t_{f,i}^{\text{start}}$,

–кінець $t_{f,i}^{\text{end}}$,

–тривалість $D_{f,i} = t_{f,i}^{\text{end}} - t_{f,i}^{\text{start}}$.

–кількість ковзних вікон у складі епізоду $n_{f,i} = \left|\mathcal{B}_{f,i}\right|$.

Ці параметри описують часову протяжність і кількість активних вікон у межах епізоду фрактальної активності.

3.3.4.2. Фрактальні характеристики епізоду

Нехай усередині епізоду $\varepsilon_{f,i}$ маємо множину значень Higuchi FD:

$$\mathcal{H}_{f,i} = \left\{ H_{f,i} \mid j \in \mathcal{B}_{f,i} \right\}. \tag{3.75}$$

Тоді базовими фрактальними характеристиками епізоду є:

–пікове значення $H_{f,i}^{\max} = \max_{j \in \mathcal{B}_{f,i}} H_{f,i}$.

–момент часу, в якому досягається пік, $t_{f,i}^{\text{peak}} = t_{f,j^*}^{(0)},\ j^* = \arg\max_{j \in \mathcal{B}_{f,i}} H_{f,i}$,

–медіанне значення всередині епізоду $\tilde{H}_{f,i} = \text{median}\left(\mathcal{H}_{f,i}\right)$.

Разом ці показники характеризують як інтенсивність фрактальної активності, так і її типовий рівень фрактальної активності в епізоді.

3.3.4.3. Просторові координати піку

Для локалізації епізоду на траєкторії визначається точка, що відповідає моменту часу $t_{f,i}^{\text{peak}}$. Якщо нормалізована траєкторія рейсу має подання:

$$\left\{ \left(t_k, x_k, y_k \right) \right\}_{k=1}^{N_f}, \tag{3.76}$$

то координати піку визначаються за точкою траєкторії, найближчою за часом до моменту досягнення максимального значення показника:

$$\left(x_{f,i}^{\text{peak}},\ y_{f,i}^{\text{peak}} \right) = \text{argmin}\left(t_k - t_{f,i}^{\text{peak}} \right). \tag{3.77}$$

За наявності географічної прив’язки додатково можуть бути визначені також координати:

$$\left(\varphi_{f,i}^{\text{peak}},\ \lambda_{f,i}^{\text{peak}} \right), \tag{3.78}$$

які використовуються для подальшої картографічної візуалізації епізодів та просторового аналізу складних зон маневрування.

3.3.4.4. Динамічні характеристики керування на основі ROT

Нехай на часовому інтервалі епізоду $\left[t_{f,i}^{\text{start}}, t_{f,i}^{\text{end}}\right]$ виділено підмножину значень кутової швидкості повороту:

$$\mathcal{R}_{f,i} = \left\{ \text{ROT}_k \mid t_k \in \left[t_{f,i}^{\text{start}}, t_{f,i}^{\text{end}}\right] \right\}. \tag{3.79}$$

Тоді динамічні характеристики епізоду визначаються як:

–середній модуль кутової швидкості повороту.

$$\left|\overline{\text{ROT}}\right|_{f,i} = \frac{1}{\left|\mathcal{R}_{f,i}\right|} \sum_{\text{ROT}_k \in \mathcal{R}_{f,i}} \left|\text{ROT}_k\right| \tag{3.80}$$

–максимальний модуль кутової швидкості повороту.

$$\left|\text{ROT}\right|_{f,i}^{\max} = \max_{\text{ROT}_k \in \mathcal{R}_{f,i}} \left|\text{ROT}_k\right|, \tag{3.81}$$

–стандартне відхилення кутової швидкості.

$$\sigma_{\text{ROT},f,i} = std\left(\mathcal{R}_{f,i}\right). \tag{3.82}$$

Ці параметри інтерпретуються відповідно як середня інтенсивність зміни курсу, пікова інтенсивність повороту [114] та варіабельність керування всередині мікроепізоду.

У результаті кожний епізод мікроруху в запропонованому підході отримує не лише часову прив’язку, а й формалізований фрактально-динамічний опис, придатний для подальшого кодування, оцінювання ризику та просторової інтерпретації.

3.4. Інтегральні показники рейсу та нормування за довжиною шляху

Для переходу від опису окремих епізодів до інтегральних характеристик рейсу необхідно врахувати відмінності у протяжності траєкторій. З цією метою для кожного рейсу додатково обчислюється повна довжина шляху:

$$s_k = \sum_{l=1}^{k-1} \sqrt{\left(X_{l+1} - X_l\right)^2 + \left(Y_{l+1} - Y_l\right)^2}\,,\ path_{NM} = \frac{L_f}{1852}. \tag{3.83}$$

Нормування епізодних характеристик за довжиною шляху дає змогу перейти від абсолютних величин до відносних індикаторів [32], придатних для зіставлення рейсів різної тривалості та протяжності. Саме на цій основі у подальшому формуються інтегральні показники щільності мікроепізодів, інтенсивності фрактальної активності та ризик-орієнтованих характеристик рейсу в цілому [274, 285, 305].

3.4.1. Щільність мікрорухів та агреговані показники рейсу

Окрім абсолютної кількості епізодів мікрорухів, для коректного порівняння рейсів різної протяжності доцільно використовувати нормовані показники інтенсивності. З цією метою вводиться щільність мікрорухів на одиницю довжини шляху:

$$\lambda_f = \frac{E_f}{L_f^{NM}}, \tag{3.84}$$

де E_f – кількість епізодів мікрорухів у рейсі f, а L_f^{NM} – довжина траєкторії в морських милях.

Показник λ_f характеризує не просто наявність локальних фрактально активних ділянок, а кількість епізодів на одиницю пройденого шляху. На відміну від абсолютної кількості епізодів, він менше залежить від тривалості проходу, що робить його придатним для міжрейсового зіставлення.

Для кожного рейсу додатково формуються агреговані характеристики епізодного рівня, зокрема:

–кількість епізодів мікрорухів;

–сумарна тривалість епізодів;

–щільність епізодів на одиницю довжини шляху;

–медіанне та максимальне пікове значення Higuchi FD у межах епізодів;

–медіанна тривалість епізоду;

–середнє значення модуля кутової швидкості повороту всередині епізодів.

У сукупності ці показники формують інтегральний опис рейсу на рівні епізодної активності [118] і дозволяють перейти від локального аналізу

окремих мікроепізодів до узагальненого профілю маневрування судна.

Таким чином, етап агрегації за рейсом забезпечує побудову компактної системи показників, яка пов’язує локальні фрактально-динамічні прояви керування з інтегральними характеристиками всього проходу судна.

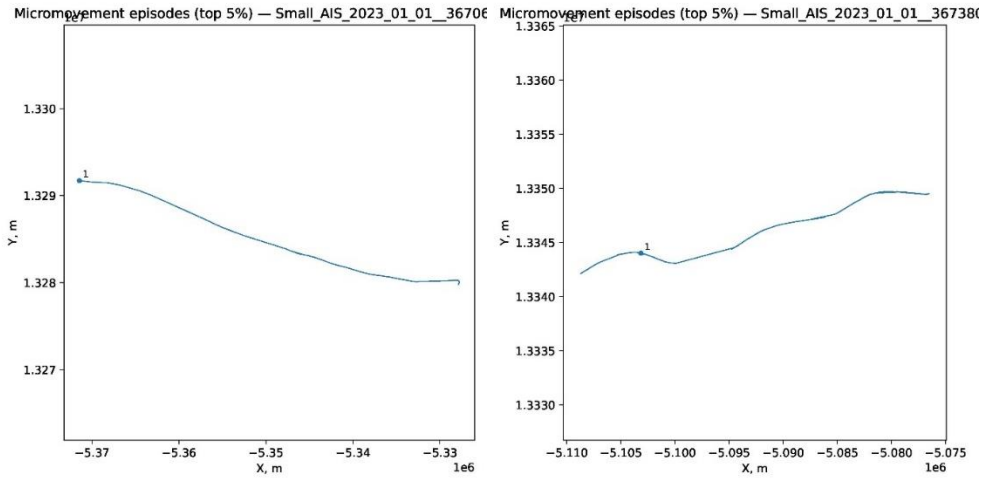
3.4.2. Проміжні результати етапу виявлення та агрегації мікрорухів

Побудований метод виявлення та агрегації епізодів мікрорухів забезпечує послідовне виконання таких процедур:

1. квантильну фільтрацію локальних фрактальних показників;
2. об’єднання прапорних ковзних вікон у часово зв’язані епізоди за параметрами T_w, Δ_{gap} і T_{min};
3. обчислення часових, просторових, фрактальних і динамічних характеристик кожного епізоду;
4. агрегацію епізодних характеристик до рівня рейсу.

У результаті цього поле локальних фрактальних показників перетворюється на компактне подання, придатне для інтерпретації як кінцева множина епізодів, яке надалі може використовуватися для класифікації рейсів, попереднього ранжування за епізодною складністю та побудови формалізованих моделей траєкторної мікроваріативності керування [285].

Для ілюстрації просторової локалізації епізодів мікрорухів на нормалізованій траєкторії наведемо відповідні приклади.



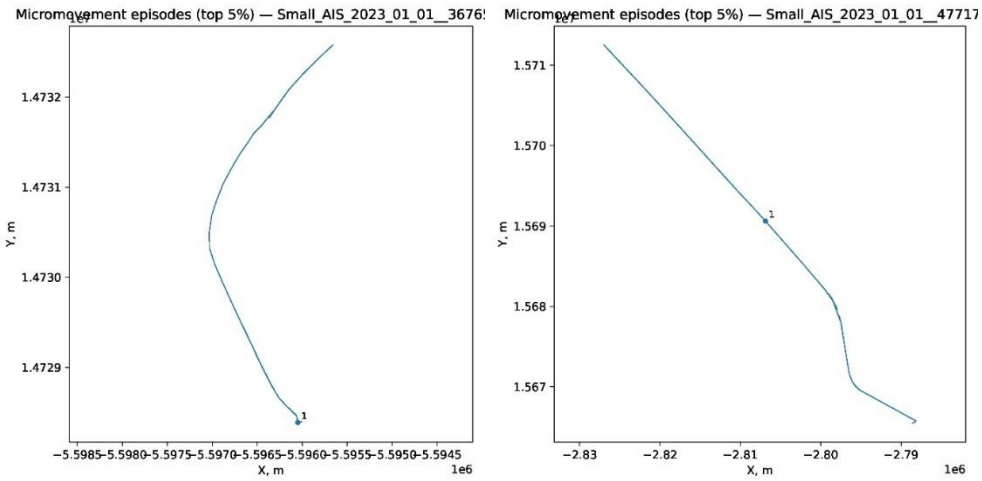
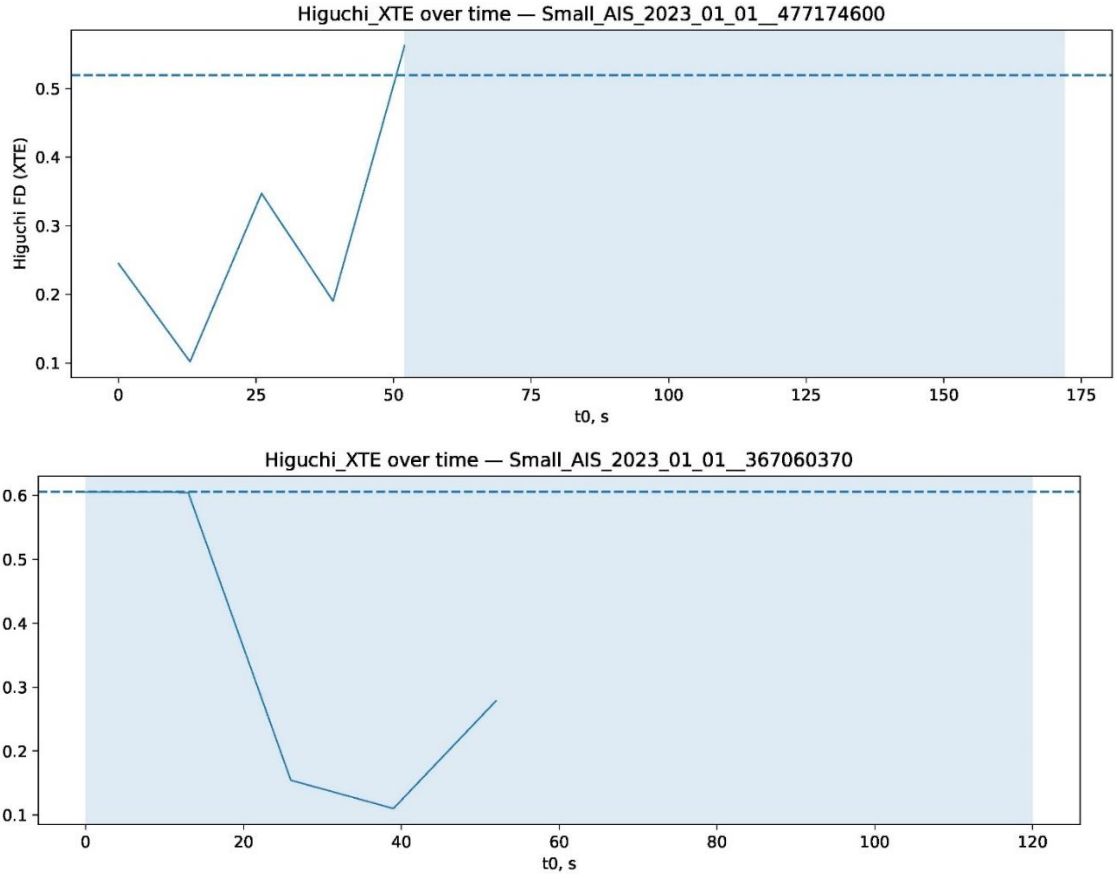


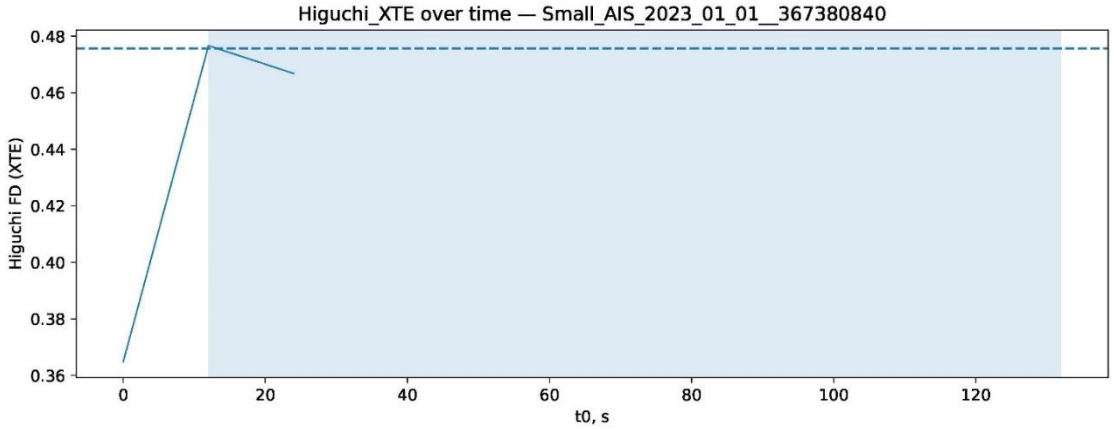
Рисунок 3.6. Просторова локалізація епізодів мікрорухів на траєкторії судна

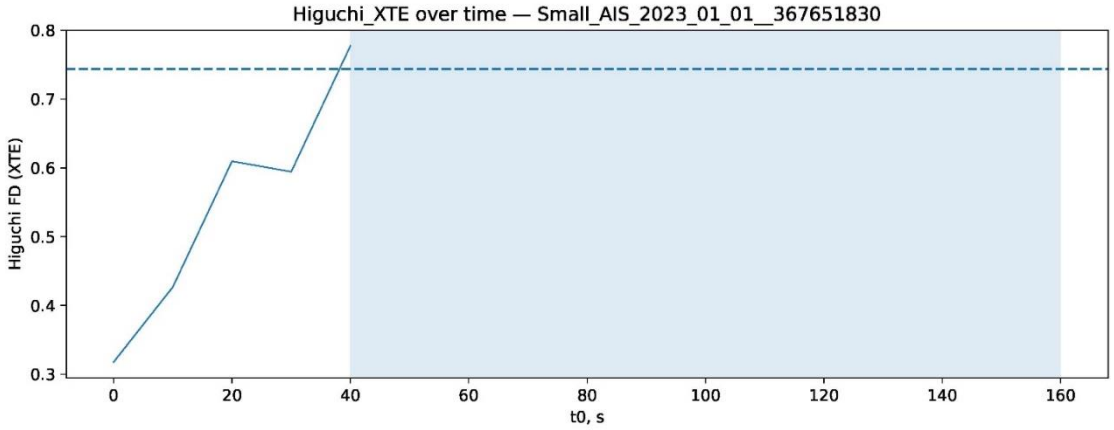
На рисунку 3.6 показано фрагменти чотирьох нормалізованих траєкторій $(X(t), Y(t))$ та положення пікових точок $\left(X_{f,i}^{peak}, Y_{f,i}^{peak} \right)$ для виділених епізодів. Така візуалізація дає змогу безпосередньо простежити, у яких ділянках маршруту концентруються локальні прояви фрактальної активності та як вони пов’язані з геометрією шляху.

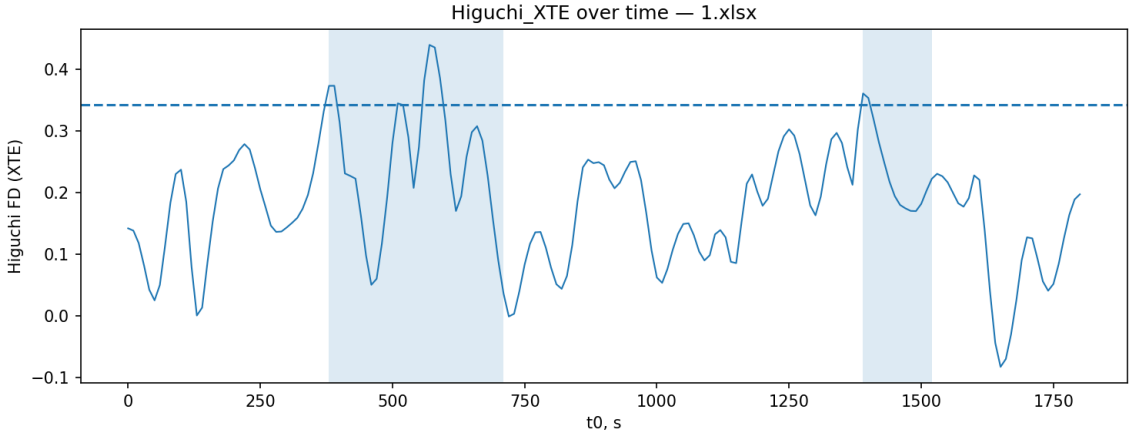
Для оцінювання часової структури мікроепізодів у полі локальних фрактальних метрик покажемо приклади їх прояву на осі часу.

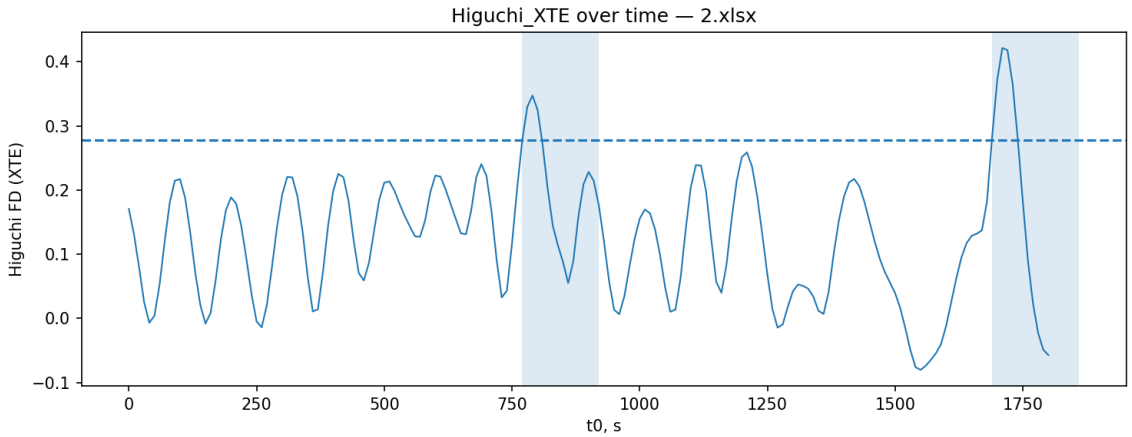


.


Higuchi_XTE over time — Small_AIS_2023_01_01__367380840
Higuchi FD (XTE)
t0, s


Higuchi_XTE over time — Small_AIS_2023_01_01__367651830
Higuchi FD (XTE)
t0, s


Higuchi_XTE over time — 1.xlsx
Higuchi FD (XTE)
t0, s


Higuchi_XTE over time — 2.xlsx
Higuchi FD (XTE)
t0, s

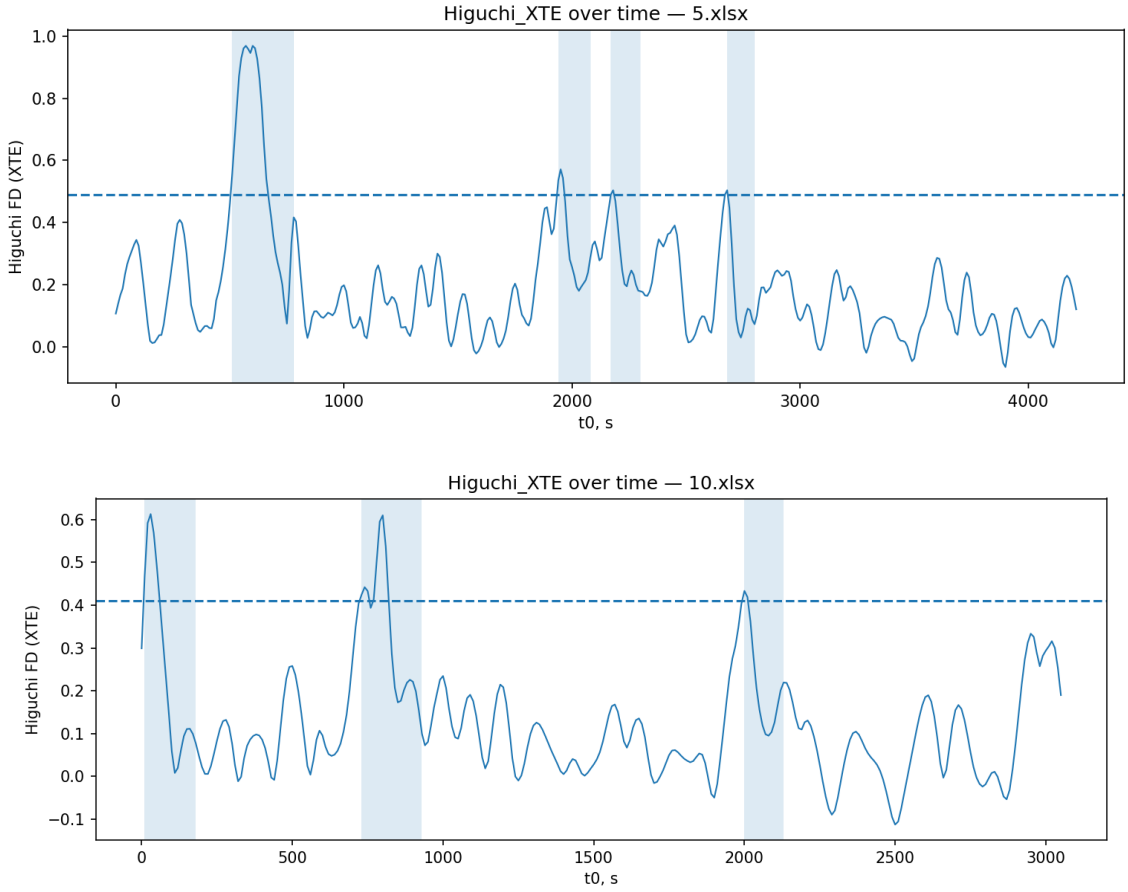


Рисунок 3.7. Епізоди мікрорухів у полі локальних значень Higuchi FD для вибраних рейсів

Рисунок 3.7 демонструє, що застосований алгоритм об’єднує окремі перевищення порога у зв’язані в часі фрагменти підвищеної фрактальної активності, які мають чіткі межі та піддаються подальшому формалізованому опису.

У результаті завершення етапу виявлення та агрегації епізодів мікрорухів створюється необхідна основа для наступного кроку – побудови методики їх фрактального кодування та розрахунку ризик-орієнтованого індексу епізодної складності.

3.4.3. Контроль параметричної стійкості результатів виявлення епізодів

Оскільки результати виявлення мікроепізодів залежать від параметрів ковзного аналізу, квантильного порога та правил агрегації активних вікон, у методиці передбачено контроль параметричної стійкості. Основними параметрами, що перевіряються, є тривалість ковзного вікна T_w, крок зміщення

T_s, квантильний поріг Q, максимально допустимий розрив між активними вікнами Δgap та мінімальна тривалість епізоду T_{min}.

Для кожної конфігурації параметрів $\theta = (T_w, T_s, Q, \Delta gap, T_{\min})$ формується множина епізодів: $E_f(\theta) = \{\varepsilon_{f,1}, ..., \varepsilon_{f,n}\}$.

Далі порівнюються такі характеристики:

$$N_E(\theta), D_{sum}(\theta), D_{med}(\theta), R_{med}(\theta), P_{peak}(\theta), \tag{3.85}$$

де N_E – кількість епізодів, D_{sum} – сумарна тривалість епізодів, D_{med} – медіанна тривалість, R_{med} – медіанний індекс епізодної складності, P_{peak} – множина просторових координат пікових точок.

Стійкими вважаються ті результати, для яких при зміні параметрів у допустимому діапазоні зберігаються основні просторові зони локалізації епізодів, ранжування фрагментів за індексом епізодної складності і загальна структура фрактальної активності рейсу. Такий контроль не змінює сутності фрактально-епізодного методу, але переводить його з режиму евристичного застосування у режим параметризованої та відтворюваної аналітичної процедури.

3.5. Методика фрактального кодування епізодів та оцінювання епізодної складності маневрування

Побудовані на попередніх етапах епізоди мікрорухів:

$$\varepsilon_{f,i} = \left(t_{f,i}^{start}, t_{f,i}^{end}, X_{f,i}^{peak}, Y_{f,i}^{peak}, \mathcal{B}_{f,i}\right), \tag{3.86}$$

що мають часові межі [17], тривалість, просторову прив’язку та набір фрактально-динамічних характеристик. На цьому етапі необхідно перейти від безперервного опису епізоду до його компактного дискретного подання, придатного для порівняння, класифікації та ризик-орієнтованої інтерпретації [117].

З цією метою кожен епізод описується вектором базових показників, які надалі квантуються за допомогою децильного квантування та кодуються шестизначним фрактальним кодом типу FC-$d_1 \ldots d_6$, де кожна цифра відповідає певній децильній групі.

Паралельно з цим для епізоду обчислюється неперервний скоринговий показник епізодної складності, який поєднує дві складові:

1. кодову, що відображає внутрішню фрактально-динамічну структуру епізоду;

2. контекстну, що враховує тривалість епізоду та інтенсивність поворотної динаміки.

У результаті формується трирівневе подання епізоду: фрактальний код – числовий індекс епізодної складності – якісний ранг епізодної складності.

3.5.1. Базові показники фрактальної сигнатури епізоду

Для кожного епізоду $\varepsilon_{f,i}$ у часовому інтервалі:

$$[t_0, t_1] = \left[t_{f,i}^{start}, t_{f,i}^{end} \right], \tag{3.87}$$

виділяється відповідний фрагмент нормалізованих даних.

Перед введенням ознак XTE_k та YTE_k задамо локальний репер Френе, пов'язаний зі згладженою опорною траєкторією. Нехай згладжена траєкторія епізоду подана параметрично як:

$$\mathbf{r}^{sm}(s) = \begin{bmatrix} x^{sm}(s) \\ y^{sm}(s) \end{bmatrix}, \tag{3.88}$$

де s – довжина дуги вздовж згладженої траєкторії. Для кожної фактичної точки епізоду:

$$\mathbf{r}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix}, \tag{3.89}$$

визначається опорна точка на згладженій траєкторії як найближча за евклідовою відстанню: $s_k^* = \arg\min \left\| \mathbf{r}_k - \mathbf{r}^{sm}(s) \right\|^2$

Відповідна опорна точка має вигляд: $\mathbf{r}_k^0 = \mathbf{r}^{sm}\left(s_k^*\right)$

Одиничний дотичний вектор локального репера Френе визначається як:

$$\mathbf{t}_k = \frac{d\mathbf{r}^{sm}(s)/ds}{\left\| d\mathbf{r}^{sm}(s)/ds \right\|}\Big|_{s=s_k^*}, \tag{3.90}$$

а одиничний нормальний вектор – як:

$$n_k = \begin{bmatrix} -t_{y,k} \\ t_{x,k} \end{bmatrix}. \tag{3.91}$$

Тоді вектор локального зміщення фактичної точки відносно згладженої опорної траєкторії задається як: $\Delta\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_k^0$.

Поперечна та уздовжшляхова компоненти зміщення визначаються проєкціями цього вектора на нормальний і дотичний одиничні вектори локального репера Френе:

$$\begin{aligned} XTE_k &= \Delta\mathbf{r}_k^T \mathbf{n}_k, \\ YTE_k &= \Delta\mathbf{r}_k^T \mathbf{t}_k. \end{aligned} \tag{3.92}$$

Таким чином, XTE_k характеризує поперечне відхилення від згладженої опорної траєкторії, а YTE_k – уздовжшляхову компоненту локального зміщення у репері Френе. Саме ці дві координати утворюють локальне подання відхилення фактичної траєкторії від її згладженої форми.

$$E_{f,i} = \left\{ t_k, x_k, y_k, XTE_k, YTE_k, ROT_k, s_k^* \right\}_{k=1}^{N_e},\ t_k \in [t_0, t_1], \tag{3.93}$$

де YTE_k – уздовжшляхова компонента зміщення у репері Френе, а ROT_k – кутова швидкість повороту.

На основі цього фрагмента для епізоду визначають шість базових ознак.

3.5.1.1. Фрактальна розмірність поперечних відхилень

Фрактальна нерегулярність ряду поперечних відхилень епізоду описується показником:

$$h_{x,raw} = D_H\left(XTE^{\text{detr}} \right), \tag{3.94}$$

де XTE^{detr} – ряд поперечних відхилень після вилучення лінійного тренду.

Для вилучення лінійного тренду з ряду XTE_k параметри трендової прямої оцінюються методом найменших квадратів:

$$\left(\hat{a}_X, \hat{b}_X \right) = \arg\min_{a,b} \sum_{k=1}^{N_e} \left[XTE_k - \left(a\left(t_k - t_0 \right) + b \right) \right]^2. \tag{3.95}$$

Після цього детрендований ряд поперечних відхилень визначається як:

$$XTE_k^{\text{detr}} = XTE_k - \left[\hat{a}_X \left(t_k - t_0 \right) + \hat{b}_X \right] \tag{3.96 а}$$

Тут t_0 – початковий момент часу епізоду, $\hat{a}_X$ – оцінка нахилу лінійного тренду $XTE(t)$, а $\hat{b}_X$ – оцінка вільного члена.

$$\left(\hat{a}_Y, \hat{b}_Y\right) = \arg\min_{a,b} \sum_{k=1}^{N_e} \left[YTE_k - \left(a\left(t_k - t_0\right) + b \right) \right]^2 ,$$

$$YTE_k^{\text{detr}} = YTE_k - \left[\hat{a}_Y \left(t_k - t_0\right) + \hat{b}_Y \right]. \qquad (3.96\text{ б})$$

3.5.1.2. Фрактальна розмірність уздовжшляхового дрейфу

Аналогічно для уздовжшляхової компоненти визначається:

$$h_{y,raw} = D_H \left(YTE^{\text{detr}} \right). \qquad (3.97)$$

Показник $h_{y,raw}$ (фрактальної нерегулярності) характеризує нерегулярність уздовжшляхового дрейфу епізоду.

3.5.1.3. Оцінка лінійного тренду поперечного зміщення

Для кількісного опису систематичної компоненти зміни поперечного зміщення використовується не миттєва швидкість у кінематичному сенсі, а оцінка нахилу лінійного тренду ряду $XTE(t)$, отримана методом найменших квадратів. З урахуванням оцінених вище параметрів $\hat{a}_X, \hat{b}_X$ вводиться показник: $\mu_{x,raw} = \left| \hat{a}_X \right|$.

Цей показник характеризує модуль нахилу лінійного тренду поперечного відхилення в межах епізоду. Якщо *XTE* задано у метрах, а час – у секундах, то $\mu_{x,raw}$ має розмірність м/с і може інтерпретуватися як оцінка швидкості поперечного дрейфу за лінійною регресією. Водночас він не є середньою швидкістю всіх локальних коливань *XTE*, а описує лише систематичну трендову складову.

3.5.1.4. Узгоджена оцінка уздовжшляхового дрейфу

Для опису уздовжшляхового дрейфу вводиться комбінований показник $\mu_{y,raw}$, який враховує як локальний дрейф у криволінійній параметризації шляху, так і глобальний дрейф у часовому поданні.

Спочатку для епізоду обчислюється довжина дуги:

$$s_k = \sum_{l=1}^{k-1} \sqrt{\left(X_{l+1} - X_l \right)^2 + \left(Y_{l+1} - Y_l \right)^2} , \qquad (3.98)$$

а також локальна кривизна траєкторії:

$$\kappa_k = \frac{\dot{x}_k \ddot{y}_k - \dot{y}_k \ddot{x}_k}{\left(\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \tag{3.99}$$

На основі κ_k визначається середньоквадратична кривизна:

$$\kappa_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N_e}\sum_{k}^{N_e} \kappa_k^2} \tag{3.100}$$

Далі оцінюється циркулярна концентрація курсу $\rho \in [0,1]$, яка характеризує ступінь узгодженості локального напрямку руху. На її основі вводиться ваговий коефіцієнт:

$$w = \rho^{\gamma} \exp\left(-\frac{\kappa_{\text{rms}}}{\kappa_0}\right), \tag{3.101}$$

$$\rho \in [0,1],\ \gamma \geq 0,\ \kappa_0 > 0,\ \kappa_{rms} \geq 0, \tag{3.102}$$

де κ_0 та γ – параметри налаштування.

За наведених обмежень виконується $0 \leq \rho^{\gamma} \leq 1$ та

$$0 < \exp\left(-\frac{\kappa_{rms}}{\kappa_0}\right) \leq 1. \tag{3.103}$$

Тому добуток цих двох множників також належить інтервалу:

$$0 \leq w \leq 1. \tag{3.104}$$

У випадку $\gamma = 0$ приймається $\rho^{\gamma} = 1$, що відповідає виключенню впливу циркулярної концентрації з вагового коефіцієнта. Параметр κ_0 задає масштаб чутливості до кривизни траєкторії: чим менше κ_0, тим сильніше зменшується w при зростанні κ_{rms}.

Спочатку вводяться два нахили: за довжиною дуги і за часом.

$$\left(\hat{a}_s, \hat{b}_s\right) = \arg\min_{a,b} \sum_{k=1}^{N_e} \left[YTE_k - \left(as_k^* + b\right)\right]^2, \tag{3.105}$$

$$\left(\hat{a}_s, \hat{b}_s\right) = \arg\min_{a,b} \sum_{k=1}^{N_e} \left[YTE_k - \left(a\left(t_k - t_0\right) + b\right)\right]^2. \tag{3.106}$$

Далі визначається медіанна швидкість уздовж опорної траєкторії:

$$v_{med} = median_k \left(\frac{s_{k+1}^* - s_k^*}{t_{k+1} - t_k}\right).$$

Після цього визначаються два компоненти уздовжшляхового дрейфу:

$$\mu_Y^{along} = \begin{cases} |\hat{a}_s| v_{med}, & v_{med} \geq v_{\min}, \\ |\hat{a}_t|, & v_{med} < v_{\min} \end{cases} \tag{3.107}$$

де $v_{min} > 0$ – мінімально допустиме значення уздовжшляхової швидкості, нижче якого перетворення нахилу за довжиною дуги на швидкість у часовій шкалі вважається чисельно нестійким.

–глобальний дрейф у часовому поданні:

$$\mu_Y^{\text{glob}} = |\hat{a}_t|. \tag{3.108}$$

Комбінований показник задається як:

$$\mu_{y,\text{raw}} = w\mu_Y^{\text{along}} + (1-w)\mu_Y^{\text{glob}}. \tag{3.109}$$

У першій гілці формули використовується нахил *YTE* за координатою дуги *s*, який має розмірність м/м, і множиться на медіанну уздовжшляхову швидкість v_{med}, що переводить показник у часову шкалу. У другій гілці, коли уздовжшляхова швидкість є малою або нестійкою, використовується безпосередній нахил *YTE*(*t*), оцінений за часом. Така форма робить показник μ_Y^{along} за розміром узгодженим і чисельно стійкішим у випадках коротких, повільних або криволінійних епізодів.

Важливо, що згортання у формулі (3.108) виконується лише після приведення обох компонент до спільної розмірності. Дуговий нахил $\hat{a}_s$ сам по собі є безрозмірною величиною, оскільки описує зміну *YTE* відносно довжини дуги. Тому перед змішуванням із часовим нахилом він множиться на v_{med}, що переводить його у шкалу м/с. Часовий компонент $\mu_Y^{\text{glob}} = |\hat{a}_t|$ відразу має розмірність м/с.

Якщо необхідно перейти до повністю безрозмірного індексного опису, обидві компоненти додатково нормуються:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_Y^{arc} &= \frac{\mu_Y^{arc} - \mu_{Y,\min}^{arc}}{\mu_{Y,\max}^{arc} - \mu_{Y,\min}^{arc} + \varepsilon}, \\ \tilde{\mu}_Y^{glob} &= \frac{\mu_Y^{glob} - \mu_{Y,\min}^{glob}}{\mu_{Y,\max}^{glob} - \mu_{Y,\min}^{glob} + \varepsilon}. \end{aligned} \tag{3.110}$$

У такому разі комбінований безрозмірний показник може бути заданий як:

$$\tilde{\mu}_Y = w\tilde{\mu}_Y^{arc} + (1-w)\,\tilde{\mu}_Y^{glob}. \tag{3.111}$$

Проте для формування початкової ненормованої ознаки епізоду $\mu_{Y,raw}$ достатнім є приведення обох компонент до спільної фізичної розмірності м/с.

3.5.1.5. Фрактальна розмірність кутової швидкості повороту

Для опису нерегулярності сигналу кутової швидкості повороту використовується:

$$h_{r,\mathrm{raw}} = D_H\left(ROT\right), \text{де } ROT = \left\{ROT_k\right\}_{k=1}^{N_e}.$$

Ця ознака характеризує нерегулярність сигналу кутової швидкості повороту всередині епізоду.

3.5.1.6. Фрактальна розмірність кривизни траєкторії

Додатково розглядається ряд приростів кривизни:

$$\Delta\kappa_k = \kappa_{k+1} - \kappa_k, \tag{3.112}$$

для якого визначається:

$$h_{c,\mathrm{raw}} = D_H\left(\left|\Delta\kappa_k\right|\right), \tag{3.113}$$

Показник $h_{c,raw}$ відображає нерегулярність приростів кривизни траєкторії та використовується як геометричний індикатор, чутливий до чисельних похибок локальної зміни траєкторії. Його інтерпретація як ознаки керування потребує врахування шуму координат, параметрів згладжування та зовнішнього навігаційного контексту. Отже, для кожного епізоду формується вектор сирих ознак:

$$\mathbf{z}_{f,i}^{\mathrm{raw}} = \left(h_{x,\mathrm{raw}}, h_{y,\mathrm{raw}}, \mu_{x,\mathrm{raw}}, \mu_{y,\mathrm{raw}}, h_{r,\mathrm{raw}}, h_{c,\mathrm{raw}}\right). \tag{3.114}$$

Саме цей вектор становить первинну фрактально-динамічну сигнатуру епізоду. Оскільки вектор $\mathbf{z}_{f,i}^{raw}$ містить різнорідні фрактальні, геометричні та динамічні характеристики, його склад не розглядається як апріорно оптимальний. У межах цієї методики він задає початковий розширений простір опису епізоду, а доцільність використання кожної ознаки має

перевірятися за критеріями інформативності, незалежності та внеску у підсумкову інтерпретацію.

Для контролю ознакового складу можуть застосовуватися: кореляційний аналіз для виявлення дублювання інформації між ознаками; аналіз головних компонентів або факторний аналіз для визначення латентних груп ознак; аналіз із послідовним вилученням ознак, за яким оцінюється зміна підсумкового критерію після вилучення окремої компоненти; а також, за наявності зовнішніх міток, оцінювання взаємної інформації між ознакою та цільовою категорією складності або ризику.

Формально внесок m-ї ознаки може бути оцінений як:

$$\Delta J_m = J\left(z_1,...,z_m,...,z_M\right) - J\left(z_1,...,\hat{z}_m,...,z_M\right), \tag{3.115}$$

де J – підсумковий індикатор або критерій якості, а $\hat{z}_m$ означає вилучення m-ї ознаки з моделі. Якщо ΔJ_m є малою, ознака вважається малоінформативною для цієї задачі. За наявності зовнішньої експертної або ризикової розмітки додатково може оцінюватися взаємна інформація:

$$I(z_m; Y), \tag{3.116}$$

де Y – зовнішня категорія складності, ризику або експертної оцінки епізоду. Таким чином, вектор $\mathbf{z}_{f,i}^{raw}$ використовується як початковий описовий простір, а остаточний склад ознак для прикладного використання має визначатися за результатами кореляційного аналізу, перевірки вилучення ознак, аналізу головних компонент PCA / факторного аналізу та, за можливості, зіставлення із зовнішніми мітками [331].

Таблиця 3.8. Контроль інформативності ознак фрактально-динамічної сигнатури епізоду

Ознака	Що описує	Потенційне дублювання	Метод перевірки внеску
h_X	Фрактальність поперечних відхилень XTE	Може дублювати локальні XTE-метрики	Абляційний аналіз, взаємна інформація
h_Y	Фрактальність уздовжшляхового дрейфу	Може бути пов’язана з кривизною маршруту	PCA / факторний аналіз
μ_X	Швидкість поперечного зміщення	Може дублювати амплітуду XTE	Кореляційний аналіз

Продовження таблиці 3.8.

μ_Y	Узгоджений уздовжшляховий дрейф	Може залежати від геометрії траєкторії	Абляційний аналіз, аналіз чутливості
h_R	Фрактальність ROT	Може дублювати змінність COG	Mutual information, тест збурень
h_C	Фрактальність приростів кривизни	Може дублювати h_R або бути шумочутливою	Тест збурень, PCA

3.5.1.7. Контроль чисельної стійкості похідних, кривизни та приростів кривизни

Оскільки частина ознак епізоду формується на основі похідних або різниці операторів, необхідно окремо враховувати їхню чисельну чутливість до шуму, нерівномірної дискретизації та похибок координатної реєстрації. До таких ознак належать ROT_i, локальна кривизна κ_i, прирости кривизни $\Delta\kappa_i$, а також похідні компоненти, що використовуються для оцінювання дрейфу вздовж траєкторії.

Для зменшення впливу випадкових координатних флуктуацій похідні не повинні обчислюватися за необробленими даними з нерівномірною дискретизацією без попереднього контролю. У методиці передбачається така послідовність:

1. збереження фактичної часової шкали спостережень;
2. попередній контроль пропусків і різких часових розривів;
3. згладжування координатної траєкторії за зафіксованим протоколом;
4. обчислення похідних з урахуванням реальних часових інтервалів;
5. перевірка стійкості похідних ознак до малих збурень траєкторії.

Для кількісної перевірки стійкості вводиться процедура тестування на збурення. Нехай початкова нормалізована траєкторія має вигляд:

$$r_i = \left(x_i, y_i\right). \tag{3.117}$$

Формується набір збурених реалізацій:

$$\mathbf{r}_i^{(b)} = \mathbf{r}_i + \varepsilon_i^{(b)},\ b = 1,\ldots,B, \tag{3.118}$$

де $\varepsilon_i^{(b)}$ – мале випадкове координатне збурення, що моделює похибку реєстрації або залишковий шум після нормалізації. Для кожної реалізації

повторно обчислюються $ROT_i^{(b)}, \kappa_i^{(b)}, \Delta\kappa_i^{(b)}$, фрактальні ознаки та ризик-орієнтовані індекси епізодної складності.

Стійкість ознаки Z оцінюється через відносну варіацію:

$$CV_Z = \frac{std\left(Z^{(1)},...,Z^{(B)}\right)}{\left|mean\left(Z^{(1)},...,Z^{(B)}\right)\right| + \varepsilon}, \tag{3.119}$$

де ε – малий стабілізуючий доданок. Якщо CV_Z є високим, відповідна ознака вважається чисельно нестійкою для цього фрагмента і не повинна інтерпретуватися як самостійний надійний індикатор без додаткової перевірки.

Додатково для контролю коректності застосовуються синтетичні траєкторії з наперед відомою структурою: прямолінійний рух, рух по дузі сталої кривизни, плавний *S*-подібний маневр та траєкторія з локально внесеним збуренням. Це дає змогу перевірити, чи не породжує алгоритм штучно завищених значень *ROT*, κ або $\Delta\kappa$ там, де геометрія траєкторії є регулярною (табл. 3.9).

Таблиця 3.9. Чисельно чутливі ознаки та способи контролю їх стійкості

Ознака	Джерело нестійкості	Потенційний наслідок	Контроль
ROT_i	Похідна курсу, розгортання кута, нерівномірний час	Хибні піки кутової швидкості	Фактичний Δt_i, згладжування, тест збурень
κ_i	Похідні координат другого порядку	Завищення локальної кривизни	Синтетичні тести, контроль шуму
$\Delta\kappa_i$	Різниця вже похідної ознаки	Посилення високочастотного шуму	Попереднє згладжування, оцінка варіації
h_R	Фрактальна оцінка ROT	Чутливість до одиничних стрибків	Перевірка після збурень
h_C	Фрактальна оцінка приростів кривизни	Нестійкість до дискретизації	Порівняння на різних кроках і фільтрах

3.5.2. Децильний бінінг та формування шестизначного коду FC-$d_1 \ldots d_6$

Оскільки ознаки $\mathbf{z}_{f,i}^{\text{raw}}$ є безрозмірними або різнорідними за масштабом, для їх компактного та відтворюваного подання використовується децильний бінінг. Для кожного показника Z на множині всіх епізодів формується вибірка:

$$\{z_n\}_{n=1}^{N} = \{Z(\varepsilon_{f,i})\}, \tag{3.120}$$

і визначаються квантильні межі:

$$q_k = Q_k(Z),\ k = 0,...,10. \tag{3.121}$$

Для забезпечення суворої монотонності меж децильних інтервалів використовується умова: $q_k \leftarrow \max(q_k,\ q_{k-1} + 10^{-12}),\ k = 1,...,10$.

Кожному значенню z_n ставиться у відповідність децильний номер:

$$d_n = \min\{d_m \in \{0,...,9\} : z_n \le q_{k+1}\}. \tag{3.122}$$

У результаті для шести базових ознак епізоду отримуємо шість цифр:

$d_1 = hX \in \{0,\ldots,9\}$ (поперечна фрактальність XTE),

$d_2 = hY \in \{0,\ldots,9\}$ (уздовжшляховий дрейф YTE),

$d_3 = \mu X \in \{0,\ldots,9\}$ (оцінка швидкості поперечного дрейфу за нахилом лінійного тренду XTE),

$d_4 = \mu Y \in \{0,\ldots,9\}$ (узгоджений дрейф),

$d_5 = hR \in \{0,\ldots,9\}$ (фрактальність ROT),

$d_6 = hC \in \{0,\ldots,9\}$ (фрактальна розмірність приростів кривизни траєкторії).

Тоді фрактальний код епізоду визначається як:

$$\text{FC-}d_1\ldots d_6, = \text{FC-}(q(hX), q(hY), q(\mu X), q(\mu Y), q(hR), q(hC)), \tag{3.123}$$

де $q(\cdot)$ – оператор децильного квантування.

Отриманий код FC-$d_1\ldots d_6$ є допоміжною дискретною інтерпретаційною сигнатурою епізоду, призначеною для стислого опису його положення у відносній шкалі ознак. При цьому код не замінює безперервний вектор $\mathbf{z}_{f,i}^{\text{raw}}$ або його нормовану форму і не повинен використовуватися як єдина метрична основа для оцінювання відстаней, подібності або ризику [244, 294].

Децильне кодування має інтерпретаційну перевагу, оскільки дає змогу швидко порівнювати епізоди за збільшеними рівнями ознак. Водночас воно призводить до втрати частини метричної інформації. Зокрема, два близькі значення ознаки можуть потрапити до сусідніх децилів, тоді як два віддалені значення можуть залишитися в межах одного децильного інтервалу. Тому код

FC-$d_1 \ldots d_6$ не розглядається як повноцінна заміна безперервного простору ознак.

Для забезпечення відтворюваності межі децильних інтервалів повинні фіксуватися відносно референтного корпусу даних:

$$B_Z^{ref} = \{q_0, q_1, ..., q_{10}\}, \tag{3.121}$$

де B_Z^{ref} – набір децильних меж для ознаки Z, побудований на заздалегідь визначеній навчальній або еталонній вибірці. Після фіксації цих меж нові епізоди кодуються не за поточним корпусом, а за збереженими референтними межами. Це зменшує ризик зміни коду одного й того самого епізоду під час додавання нових даних.

У зв'язку з цим у методиці розрізняють два рівні подання: $z_{f,i}^{norm} \rightarrow$ основний безперервний ознаковий опис, FC-$d_1 \ldots d_6 \rightarrow$ допоміжний дискретний інтерпретаційний код.

Відстані між епізодами, кластеризація та статистичне порівняння мають виконуватися насамперед у нормованому безперервному просторі ознак, тоді як код FC-$d_1 \ldots d_6$ доцільно використовувати для компактної візуалізації, групування типових профілів і пояснення результатів.

Таблиця 3.10. Статус безперервного простору ознак та коду FC-$d_1 \ldots d_6$

Подання	Перевага	Обмеження	Рекомендоване використання
$z_{f,i}^{raw}$	Зберігає повну метричну інформацію	Різні масштаби ознак	Первинний опис епізоду
$z_{f,i}^{norm}$	Порівнюваність ознак у спільній шкалі	Залежить від методу нормування	Кластеризація, відстані, статистика
FC-$d_1 \ldots d_6$	Компактність і зручність інтерпретації	Втрата метричної точності, залежність від меж бінів	Візуалізація, типологізація, пояснення
FC з референтними межами	Вища відтворюваність	Потребує стабільного еталонного блоку	Порівняння нових епізодів із базою

Сімейством коду вважається комбінація його перших двох цифр.

$$\text{Family } (FC) = d_1 d_2 \in \{00, \ldots, 99\}, \tag{3.122}$$

які характеризують сукупний рівень поперечної та уздовж шляхової фрактальної нерегулярності.

3.5.3. Розрахунок ризик-орієнтованого індексу епізодної складності: кодова та контекстна складові.

Паралельно з кодуванням епізодів формується неперервний ризик-орієнтований скоринговий індекс епізодної складності $R_{f,i}^{tot} \in [0,1]$. Його побудова ґрунтується на поєднанні двох складових: кодової, як функції від децильних значень фрактально-динамічних ознак; контекстної, як функції від тривалості епізоду та RMS кутової швидкості повороту.

У межах цього розділу $R_{f,i}^{tot}$ визначається як ризик-орієнтований скоринговий індекс епізодної складності, призначений для ранжування епізодів за сукупністю фрактально-динамічних ознак, тривалості та інтенсивності поворотної динаміки. До зовнішньої калібрації його значення характеризує відносну пріоритетність подальшого аналізу епізоду.

Статистична ризикова інтерпретація $R_{f,i}^{tot}$ передбачає калібрування за даними про небезпечні зближення, порушення навігаційних обмежень, експертно позначені складні епізоди або результати тренажерних експериментів.

3.5.3.1. Кодова складова скорингового індексу епізодної складності

Оскільки показники μ_X^{raw} та μ_Y^{raw} описують різні компоненти трендової зміни – поперечну та уздовжшляхову, – вони не повинні безпосередньо змішуватися у формулі індексу без попереднього узгодження шкали. Для цього вводиться єдина безрозмірна ознака амплітуди дрейфу:

$$d_{f,i} = \sqrt{\left(\tilde{\mu}_{X,f,i}\right)^2 + \left(\tilde{\mu}_{Y,f,i}\right)^2}, \tag{3.123}$$

де $\tilde{\mu}_{X,f,i}$ і $\tilde{\mu}_{Y,f,i}$ – нормовані безрозмірні значення поперечного та уздовжшляхового трендових показників:

$$\tilde{\mu}_{X,f,i} = \frac{\mu_{X,raw} - \mu_{X,\min}}{\mu_{X,\max} - \mu_{X,\min} + \varepsilon}, \tag{3.124}$$

$$\tilde{\mu}_{Y,f,i} = \frac{\mu_{Y,raw} - \mu_{Y,\min}}{\mu_{Y,\max} - \mu_{Y,\min} + \varepsilon}. \quad (3.125)$$

Для приведення $d_{f,i}$ до інтервалу [0,1] використовується додаткове нормування: $\tilde{d}_{f,i} = \frac{d_{f,i}}{\max(d) + \varepsilon}$.

Показник $\tilde{d}_{f,i}$ характеризує узгоджену амплітуду трендового дрейфу епізоду в нормованому просторі та може використовуватися як окрема складова кодового скорингу.

Кодова складова визначається як:

$$S_{f,i}^{\text{code}} = \alpha_1 \cdot \frac{hX_{f,i} + hY_{f,i}}{18} + \alpha_2 \cdot \frac{hR_{f,i} + hC_{f,i}}{18} + \alpha_3 \tilde{d}_{f,i}, \quad (3.126)$$

де: $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad \alpha_m \geq 0$.

Перший доданок відображає відносний рівень фрактальної нерегулярності поперечної та уздовжшляхової компонент, другий – фрактальну нерегулярність ROT і приростів кривизни, третій – нормовану амплітуду трендового дрейфу. До зовнішньої калібрації коефіцієнти α_1, α_2, α_3 мають статус експертно заданих параметрів скорингової моделі, а не статистично доведених ваг ризику.

3.5.3.2. Контекстна складова скорингового індексу епізодної складності

Контекстна складова скорингового індексу епізодної складності враховує відносну тривалість епізоду та наскільки інтенсивними є повороти всередині нього.

Для врахування часової розгорнутості епізоду вводиться нормована тривалість $C_{f,i}^{D}$. Її розрахунок потребує задання референтної тривалості D_{ref}, відносно якої тривалість конкретного епізоду переводиться до шкали [0,1]. У межах цієї методики D_{ref} має задаватися одним із трьох відтворюваних способів: як фіксоване значення, обране за протоколом дослідження; як квантиль розподілу тривалостей епізодів у навчальній вибірці; як параметр, оптимізований за зовнішніми мітками складності або ризиковості.

У разі відсутності зовнішніх міток доцільно використовувати квантильний варіант: $D_{ref} = Quantile_q\left(\left\{D_{f,i}\right\}_{train}\right)$, де q – заданий квантиль, наприклад q = 0,90 або q = 0,95 а $\left\{D_{f,i}\right\}_{train}$ – множина тривалостей епізодів у навчальному або референтному корпусі.

Спочатку визначається нормована тривалість епізоду:

$$C_{f,i}^{D} = \text{clip}\left(\frac{D_{f,i}}{D_{ref}}, 0,1\right), \tag{3.127}$$

$$D_{f,i} = t_{f,i}^{end} - t_{f,i}^{start}. \tag{3.128}$$

Якщо, $D_{f,i} \geq D_{ref}$ то $C_{f,i}^{D} = 1$, тобто нормована тривалість епізоду досягає верхньої межі шкали. Якщо $D_{f,i} < D_{ref}$, значення $C_{f,i}^{D}$ пропорційно відображає частку референтної тривалості.

Далі визначається RMS кутової швидкості повороту:

$$ROT_{f,i}^{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_e}\sum_{k}^{N_e} ROT_k^2}. \tag{3.129}$$

Для нормування інтенсивності поворотних дій використовується референтне значення ROT_{ref}^{rms}. Воно має бути задане однозначно: або як фіксований параметр протоколу, або як квантиль розподілу $ROT_{f,i}^{rms}$ у референтній вибірці, або як параметр, відкалібрований за зовнішніми мітками складності епізодів.

За відсутності зовнішньої калібрації доцільно задавати:

$$ROT_{ref}^{rms} = Quantile_q\left(\left\{ROT_{f,i}^{rms}\right\}_{train}\right). \tag{3.130}$$

У такому записі $ROT_{f,i}^{rms}$ є середньоквадратичним значенням кутової швидкості в межах конкретного епізоду, а ROT_{ref}^{rms} – референтним значенням, що задає масштаб нормування для корпусу епізодів.

Тоді:

$$C_{f,i}^{rot} = \text{clip}\left(\frac{ROT_{f,i}^{rms}}{ROT_{ref}^{rms}}, 0,1\right), \tag{3.131}$$

де $ROT_{f,i}^{rms}$ – референтне значення RMS кутової швидкості повороту.

Контекстний індекс задається як зважена сума двох нормованих величин:

$$C_{f,i} = \eta_1 C_{f,i}^{D} + \eta_1 C_{f,i}^{\text{rot}}, \tag{3.132}$$

де: $\eta_1 + \eta_2 = 1$, $\eta_1 \geq 0$, $\eta_2 \geq 0$.

Якщо немає зовнішньої калібрації, то $\eta_1 = \eta_2 = 0{,}5$.

Однакові ваги $\eta_1 = \eta_2 = 0{,}5$ використовуються як базова експертна конфігурація, що однаково враховує часову розгорнутість епізоду та інтенсивність поворотної динаміки. За наявності зовнішніх даних ці ваги також можуть бути відкалібровані.

3.5.3.3. Повний скоринговий індекс епізодної складності

Повний скоринговий індекс епізодної складності формується як зважене поєднання кодової та контекстної складових. Нехай $S_{f,i}^{code}$ – кодова складова, що відображає фрактально-динамічну структуру епізоду, а $C_{f,i}$ – контекстна складова, що враховує тривалість епізоду та інтенсивність поворотних дій. Тоді повний скоринговий індекс визначається як:

$$S_{f,i}^{\text{tot}} = \beta_1 \cdot S_{f,i}^{\text{code}} + \beta_1 \cdot C_{f,i}, \tag{3.133}$$

де:

$$\beta_1 + \beta_2 = 1, \beta_1 \geq 0, \beta_2 \geq 0. \tag{3.134}$$

За наявності зовнішніх міток $Y_{f,i}$, що відображають експертно або фактично підтверджені рівні небезпечності епізодів, вагові коефіцієнти в індексі $R_{f,i}^{\text{tot}}$ можуть бути не задані евристично, а оцінені за даними. У цьому випадку індекс може бути калібрований, наприклад, через логістичну, порядкову або регресійну модель:

$$P\left(Y_{f,i} = 1 \mid z_{f,i}\right) = \sigma\left(\beta_0 + \beta^T z_{f,i}\right), \tag{3.135}$$

де $Y_{f,i}$ – зовнішня мітка ризикового або складного епізоду, $z_{f,i}$ – нормований вектор ознак, β – параметри, оцінені за навчальною вибіркою, а $\sigma(\cdot)$ – логістична функція. Така калібрація дає змогу перейти від евристичного скорингу до статистично обґрунтованої ризикової моделі.

За відсутності зовнішніх міток ваги $\beta_1 = 0{,}6$, $\beta_2 = 0{,}4$ задають початкову експертну конфігурацію для ранжування та візуалізації епізодів; їх подальше уточнення здійснюється за результатами зовнішньої калібрації (табл. 3.11).

Таблиця 3.11. Статус індексу епізодної складності до та після зовнішньої калібрації

Варіант моделі	Джерело ваг	Що дає змогу стверджувати	Що не можна стверджувати
Евристичний індекс	Задані ваги 0,6 та 0,4 і внутрішні компоненти	Епізод має вищу фрактально-динамічну складність	Епізод має статистично доведений реальний ризик
Експертно калібрований індекс	Ваги узгоджені з експертною розміткою	Експертна розмітка відносить епізод до складних	Імовірність аварійної події без фактичних даних
Статистично калібрована модель	Ваги оцінені за зовнішніми мітками	Можна оцінювати зв’язок ознак із ризиковими подіями	Причинність без додаткового аналізу
Операційно валідована модель	Дані реальних подій, журналів, тренажерів	Можлива практична ризикова інтерпретація	Абсолютна універсальність для всіх акваторій

3.5.4. Рангова категоризація епізодної складності та формування сімейств кодів

На основі значення $R_{f,i}^{\text{tot}}$ та самого коду FC-$d_1 \ldots d_6$ вводиться трирівнева категоризація епізодної складності:

–High – високий рівень епізодної складності, якщо $S_{f,i}^{tot} \geq \theta_H$;

–Medium – помірний рівень епізодної складності, якщо $\theta_M < S_{f,i}^{tot} < \theta_H$;

–Low – низький рівень епізодної складності, якщо $S_{f,i}^{tot} > \theta_M$.

Категоризація High / Medium / Low використовується як інтерпретаційна рангова шкала для попереднього групування епізодів за рівнем фрактально-динамічної складності, тривалістю та інтенсивністю маневрової активності.

За наявності зовнішньої вибірки з мітками $Y_{f,i}$, що відображають експертно підтверджену складність або небезпечність епізоду, пороги категоризації можуть бути визначені не евристично, а на основі даних. У цьому випадку межі категорій обираються за критеріями роздільної здатності

між класами, стабільності на тестовій вибірці та мінімізації помилок віднесення епізодів до рангів.

Формально задача калібрування може бути подана як:

$$\theta^{*} = \arg\max_{\theta} Q_{qual}\left(C_{\theta}\left(R_{f,i}^{tot}\right), Y_{f,i}\right), \tag{3.136}$$

де θ – набір порогів, C_{θ} – правило категоризації, $Y_{f,i}$ – зовнішня мітка, а $Q_{qual}(\cdot)$ – критерій якості класифікації або ранжування.

До зовнішньої калібрації пороги High / Medium / Low визначаються за експертною або квантильною схемою.

Категорія High призначається за умовою:

$$High_{f,i} \Leftrightarrow \left(hX_{f,i} \geq 8 \wedge hY_{f,i} \geq 8\right) \vee \left(\left(hR_{f,i} \geq 8 \vee hC_{f,i} \geq 8\right) \wedge D_{f,i} \geq D_{hight}\right), \tag{3.137}$$

де D_{high} – порогове значення тривалості епізоду з підвищеною фрактальною нерегулярністю ROT або кривизни.

Категорія Medium призначається у разі виконання умови:

$$Medium_{f,i} \Leftrightarrow \neg High_{f,i} \wedge \left[\left(hX_{f,i} + hY_{f,i} \geq 12\right) \vee \left(hR_{f,i} + hC_{f,i} \geq 12\right) \vee \left(S_{f,i}^{tot} \geq S_{med}\right)\right]$$

$$Low_{f,i} \Leftrightarrow \neg High_{f,i} \wedge \neg Medium_{f,i} \tag{3.138}$$

Рангова категоризація епізодів виконується безпосередньо за повним скоринговим індексом епізодної складності $S_{f,i}^{tot}$. Такий підхід усуває дублювання логічних правил і забезпечує узгодженість між числовою та якісною інтерпретацією епізоду:

$$High_{f,i} \Leftrightarrow S_{f,i}^{tot} \geq \theta_{H}, \tag{3.139}$$

$$Medium_{f,i} \Leftrightarrow \theta_{M} \leq S_{f,i}^{tot} < \theta_{H}, \tag{3.140}$$

$$Low_{f,i} \Leftrightarrow S_{f,i}^{tot} < \theta_{M}. \tag{3.141}$$

де θ_H і θ_M – пороги високого та помірного рангу епізодної складності. Вони можуть задаватися як експертні значення, квантилі навчальної вибірки або параметри, відкалібровані за зовнішніми мітками складності / ризиковості.

У завершеному вигляді кожен епізод мікроруху $\varepsilon_{f,i}$ описується трійкою $\left(\mathrm{FC} - d_1 \ldots d_6,\ R_{f,i}^{\mathrm{tot}},\ \mathrm{RisrLevel}_{f,i}\right)$ що дає змогу поєднати компактну фрактальну сигнатуру, числовий індекс епізодної складності та якісну категорію. Для

просторової ілюстрації отриманих результатів покажемо траєкторії суден з позначенням пікових точок епізодів, позначених кольором відповідно до рангу складності.

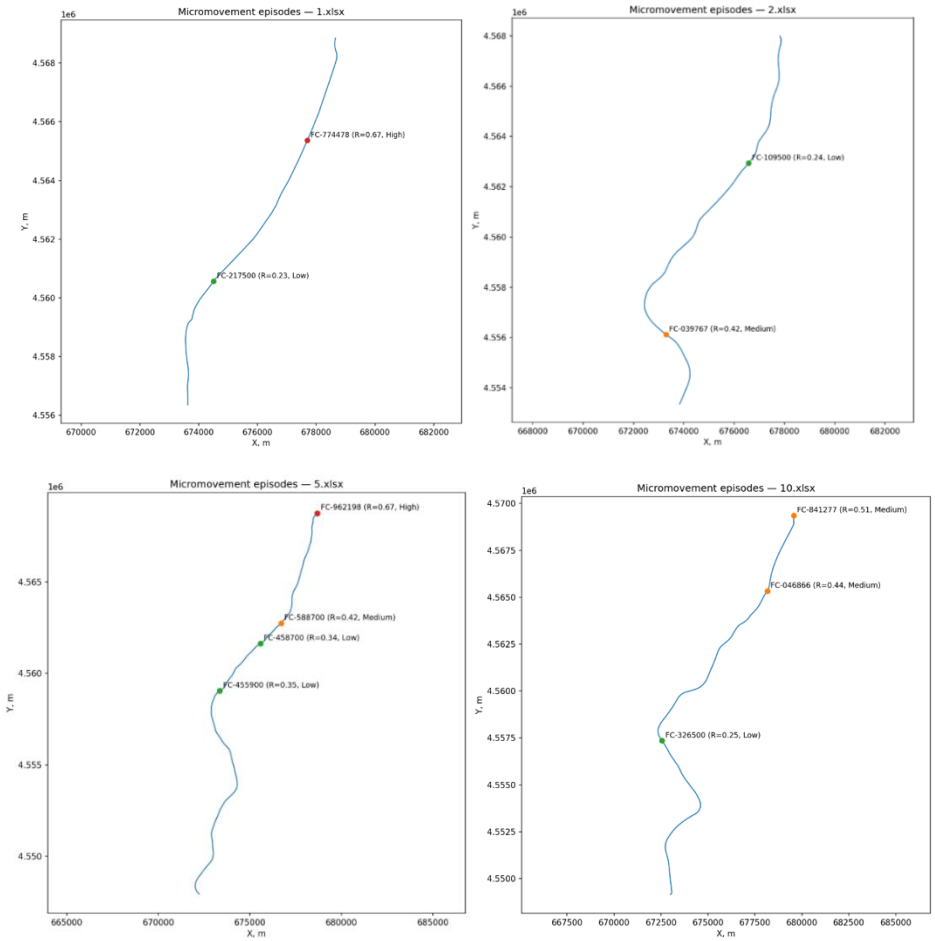


Рисунок 3.8. Траєкторії суден та точки піків епізодів мікрорухів, зафарбовані за рангом епізодної складності Low/Medium/High, з підписами коду FC-$d_1 \ldots d_6$ та значення $R^{\text{tot}}_{f,i}$

Рисунок 3.8 демонструє, що запропонована система кодування та ризик-орієнтованої категоризації забезпечує не лише числовий, а й просторово локалізований опис, придатний для інтерпретації локальних особливостей руху судна вздовж траєкторії.

3.5.5. Міжрейсова подібність кодів та підсумкові вихідні структури

Побудовані коди епізодів можуть використовуватися не лише для інтерпретації окремих мікрорухів, а й для аналізу подібності між рейсами. Для цього формуються:

1. перелік унікальних кодів FC-$d_1 \ldots d_6$ для кожного рейсу;

2. перелік сімейств кодів *ab*;

3. зведені статистики ризику за рейсами;

4. матриці схожості між наборами кодів різних рейсів.

Як міру близькості кодових сигнатур можуть бути використані середня Hamming-відстань між наборами кодів рейсів, а як додатковий структурний індикатор – кількість спільних сімей кодів між рейсами. Такий підхід дає змогу перейти від аналізу окремих епізодів до порівняння рейсів за структурою локальної фрактальної активності, що є важливим для подальшої кластеризації, типологізації стилів маневрування та побудови класифікаційних моделей операторської діяльності [11]. Для візуалізації міжрейсової близькості кодових сигнатур використаємо матрицю спільних сімейств і матрицю Hamming-подібності.

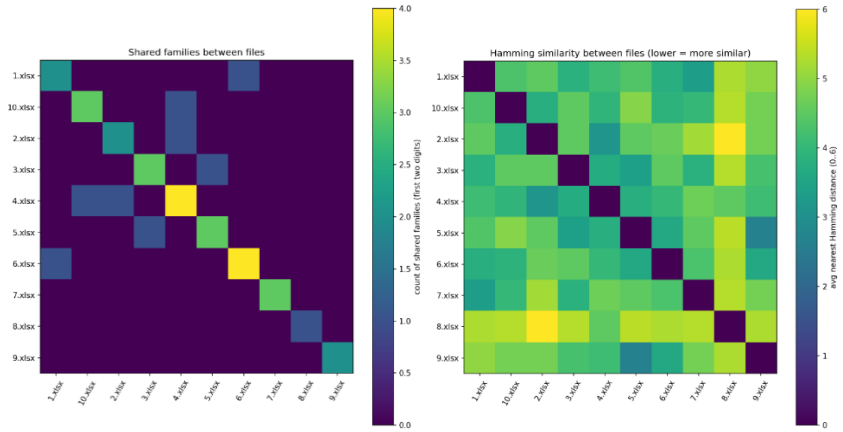


Рисунок 3.9. Матриця Hamming відстаней між фрактальними кодами епізодів

Рисунок 3.9 показує, що побудований апарат фрактального кодування створює основу для переходу від локального аналізу окремих мікроепізодів до міжрейсового зіставлення та типологізації поведінки суден.

У програмній реалізації результатами цього етапу є:

–таблиця кодів і ризиків за епізодами;

–легенда децильних меж для відтворюваного кодування;

– таблиці зведених статистик за рейсами;

–матриці структурної подібності між рейсами;

–графічні ілюстрації часової, просторової та кодової й індексної інтерпретації епізодів.

Це дає змогу зробити висновок, що етап фрактального кодування завершує побудову локальної сигнатури мікроруху: безперервний фрактально-динамічний опис епізоду переводиться у компактну дискретну форму, доповнюється неперервним індексом епізодної складності і стає придатним для порівняння, класифікації та подальшої інтеграції в інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень.

3.6. Фрактальне оцінювання індексу хаотичності – впевненості при керуванні судном за ІСНЗ-траєкторіями

3.6.1. Постановка задачі та методичне позиціонування

Побудований у попередніх підрозділах фрактально-епізодний апарат забезпечує виявлення мікрорухів судна, їх просторово-часову локалізацію, фрактальне кодування та епізодне оцінювання ризику. Разом з тим для завдань експлуатаційного моніторингу, пріоритетного ранжування та оцінювання ризику такого рівня подання недостатньо, оскільки практичне прийняття рішень вимагає не лише опису окремих епізодів, а й компактного інтегрального індикатора, що характеризує траєкторну мікроваріативність проходу в цілому.

Необхідність такого переходу зумовлена тим, що у складних навігаційних умовах ризик формується не лише геометрією маршруту або кінематичними відхиленнями, а й структурою мікроваріативності керування: частотою та нерегулярністю мікрокорекцій, нестійкістю локальної траєкторної динаміки [16], підвищеною фрактальною складністю фрагментів траєкторії [13]. Тому подальше узагальнення має ґрунтуватися не на окремому локальному показнику, а на агрегуванні масштабних фрактальних ознак, уже введених у попередніх підрозділах.

У зв’язку з цим у цьому підрозділі розв’язується задача побудови інтегральної моделі індексу хаотичності – впевненості, у межах якої множина віконних фрактальних характеристик агрегується на рівні рейсу, нормується до єдиної шкали та згортається в індекс chaos_score(f). Його комплементарним поданням є індекс confidence_index(f) = 1 – chaos_score(f) [305]. Таке подання

має забезпечити одночасно інтерпретованість, стійкість за різного обсягу віконного покриття та придатність до подальшої статистичної валідації щодо зовнішніх ризикових атрибутів.

3.6.2. Множина проходів і цільові індикатори

Базовою одиницею аналізу в даному підрозділі приймається рейс судна *f*, представлений окремим траєкторним треком і розглянутий як послідовність ІСНЗ-спостережень, упорядкована за часом:

$$T_f = \left\{ \left(t_i, \varphi_i, \lambda_i \right) \right\}_{i=1}^{N_f}, \tag{3.142}$$

де t_i – часова мітка спостереження, φ_i, λ_i – географічні координати, N_f – кількість точок у траєкторії. Сукупність усіх проходів утворює множину:

$$\Phi = \{f_1, f_2, \ldots, f_M\}, \tag{3.143}$$

де M – загальна кількість проходів у сукупності, що досліджується.

На відміну від попередніх підрозділів, де основна увага приділялася локальним вікнам та епізодам мікрорухів, тут об’єктом аналізу є вже увесь рейс *f*, для якого потрібно побудувати компактний інтегральний опис.

Для кожного проходу $f \in \Phi$ вводиться інтегральний індекс хаотичності:

$$chaos\_score(f) \in [0,1], \tag{3.144}$$

який характеризує відносний рівень фрактально-динамічної нерегулярності траєкторної реалізації руху та використовується як показник траєкторної мікроваріативності проходу.

Важливо підкреслити, що *confidence_index*(*f*) не є незалежним другим індексом, оскільки не містить нової інформації порівняно з *chaos_score*(*f*). Він подає той самий інтегральний результат у комплементарній шкалі: високі значення *confidence_index*(*f*) відповідають нижчій траєкторній мікроваріативності, а низькі – вищій нерегулярності руху. Отже, йдеться не про дві незалежні метрики, а про два взаємно однозначні подання одного інтегрального показника проходу.

3.6.3. Методичні вимоги до індексної моделі

Побудова індикатора такого типу має задовольняти три ключові вимоги.

По-перше, індекс має спиратися на вже сформовані результати фрактально-епізодного аналізу, тобто використовувати не зовнішні евристики, а агреговану інформацію про локальну структуру мікрорухів, отриману через ковзні фрактальні показники та їх узагальнення на рівні рейсу.

По-друге, індекс має бути робастним до неоднорідного покриття даними. Для фрактальних агрегатів типу розкиду та пікових проявів статистична стабільність істотно залежить від кількості доступних вікон. Тому під час побудови та валідації індикатора необхідно враховувати обмеження на мінімальне віконне покриття та окремо перевіряти висновки на робастній підмножині проходів.

По-третє, індекс повинен бути валідованим щодо зовнішніх ризикових атрибутів, тобто не лише відображати внутрішню структуру мікроваріативності керування, а й статистично узгоджуватися з дискретними рівнями ризику та складності подій [12].

Саме з урахуванням цих вимог у подальшому формується підпис проходу, вводиться правило нормування компонент і визначається математична модель індексу хаотичності – впевненості.

3.6.4. Атрибути ризику та логіка подальшої валідації

Щоб інтегральний індекс міг використовуватися як інструмент оцінювання ризику, необхідно перевірити його узгодженість із зовнішніми дискретними атрибутами небезпеки. У цьому дослідженні для проходу f вводяться два такі атрибути:

$$risk\_level(f) \in \{Low, High, Critical\}, \tag{3.145}$$

$$severity\_code(f) \in \{0,1,2,3\}. \tag{3.146}$$

Тоді задача валідації формулюється у двох аспектах: по-перше, потрібно перевірити, чи здатний $chaos\_score(f)$ статистично розрізняти групи проходів з різними значеннями $risk\_level(f)$; по-друге, потрібно встановити, чи існує монотонний зв’язок між $chaos\_score(f)$ та порядковою змінною $severity\_code(f)$. Окремо виділяється вимога робастності, що перевіряється на підмножині проходів із достатнім віконним покриттям.

Таким чином, у цьому підрозділі інтегральна індексна модель від самого початку розглядається не як ізольований описовий показник, а як формально визначений, статистично перевірюваний і придатний до практичної інтерпретації інструмент оцінювання нестабільності керування судном.

3.6.5. Контекст вибірки та узгодженість шкали

Для практичного використання показників *chaos_score* і *confidence_index* необхідно, щоб їх було визначено в узгодженій шкалі та розглянуто в контексті репрезентативної сукупності проходів.

З цією метою передбачається формування зведеної характеристики вибірки, яка включає кількість треків, кількість включених і виключених проходів після контролю якості, а також мінімальні, максимальні та центральні значення індексів у межах референтного корпусу даних.

У межах розділу 3 емпіричний корпус проходів розглядається лише як референтна основа для визначення шкали нормування, порогів і правил побудови індексу хаотичності *chaos_score*, що характеризує траєкторну мікроваріативність проходу. Кількісна характеристика корпусу AIS/ECDIS-проходів, емпіричні діапазони *chaos_score* і *confidence_index*, а також результати їх статистичної перевірки наведені у розділі 6 як частина експериментальної верифікації розробленого фрактально-епізодного апарату.

Побудова індексу хаотичності – впевненості в цьому підрозділі спирається на три сформовані компоненти: фрактально-епізодний опис мікрорухів, зовнішні ризикові атрибути та узгоджену емпіричну шкалу сукупності проходів. На цій основі далі вводиться формальна модель на рівні рейсу та подаються математичні визначення $chaos\_score(f)$ і $confidence\_index(f)$.

3.6.6. Математична модель індексу хаотичності $chaos\_score(f)$ як показника траєкторної мікроваріативності

Після формалізації множини проходів Ф, введення цільових індикаторів $chaos\_score(f)$ і $confidence\_index(f)$, а також визначення зовнішніх

ризикових атрибутів $risk\_level(f)$ і $severity\_code(f)$ наступним кроком є побудова власне математичного апарату, який перетворює локальні фрактальні оцінки у компактний інтегральний показник рейсу.

У межах даної моделі вихідні ІСНЗ-спостереження не агрегуються безпосередньо. Спочатку для кожного рейсу формується множина ковзних вікон, у кожному з яких оцінюються локальні масштабні характеристики мікроманеврування. Далі ці оцінки агрегуються в ознаковий підпис рейсу, нормуються до спільної шкали та згортаються в скалярний індекс хаотичності. Відповідно, модель має трирівневу структуру:

1. локальний рівень – віконні фрактальні характеристики;
2. агрегований рівень – ознаковий підпис рейсу;
3. індексний рівень – $chaos\_score(f)$ та комплементарний $confidence\_index(f)$.

Саме така багаторівнева побудова забезпечує одночасно інтерпретованість, відтворюваність і придатність моделі для статистичної валідації.

3.6.6.1. Ковзні вікна та показник покриття

Для кожного рейсу $f \in \mathcal{F}$ формується множина ковзних вікон:

$$W_f = \{1, 2, ...n_f\}, n_f = n_{windows}(f) \quad (3.147)$$

де n_f – кількість доступних вікон для даного проходу. Кожне вікно $j \in W_f$ відповідає часовому інтервалу: $(\tau_j, \tau_i + T_w)$, де T_w – довжина вікна, а $T_s = \tau_{j+1} - \tau_j$ – крок зсуву між сусідніми вікнами.

У межах кожного вікна формується локальний дискретний сигнал:

$$X_{f,j}(n),\ n = 1,2,\ldots,L_{f,j}, \quad (3.148)$$

який у даному дослідженні відображає мікроманеврування судна через XTE-похідні характеристики та є носієм локальної фрактально-динамічної нерегулярності траєкторії. Саме на цьому рівні фіксується «почерк» керування – дрібні, але систематично значущі прояви нестійкості, надлишкових корекцій і мікродинамічних флуктуацій.

Оскільки надійність агрегатів типу середнього розкиду і максимуму суттєво залежить від кількості доступних вікон, показник

$$n_{windows}(f) = n_f, \tag{3.149}$$

розглядається не лише як технічний параметр, а й як індикатор повноти віконного покриття.

Таблиця 3.12. Розподіл показника $n_{windows}(f)$ у корпусі треків

N_windows	count	share	share_pct
1	3685	0,424246	42,42
2	773	0,088994	8,9
3	632	0,072761	7,28
4	1866	0,214828	21,48
5	1570	0,180751	18,08
6	158	0,01819	1,82
7	2	0,00023	0,02

Табл. 3.12 задає емпіричний контекст надійності віконних агрегатів і надалі використовується при формуванні робастної підмножини треків, для яких статистичні висновки є стабільнішими.

3.6.6.2. Локальні фрактальні оцінки у вікні

Для кожного вікна $j \in W_f$ обчислюється набір локальних масштабних характеристик, що описують нерегулярність сигналу $x_{f,j}$. У даній моделі використовуються три базові показники:

1. фрактальна розмірність Higuchi, $H_{f,j} = D_H(x_{f,j})$,

2. показник DFA, $D_{f,j} = \alpha(x_{f,j})$,

3. фрактальна розмірність Katz, $K_{f,j} = D_K(x_{f,j})$.

Математичні визначення фрактальної розмірності Higuchi, показника DFA та фрактальної розмірності Katz подано в підрозділах 3.2.3–3.2.5, тому далі ці оцінки використовуються як уже введений інструментарій локального масштабного опису.

Зростання $H_{f,j}$, $D_{f,j}$, $K_{f,j}$ та їх варіабельності в межах рейсу характеризує ускладнення масштабної структури мікрокорекцій і може відображати підвищену складність локального маневрування або зміну взаємодії оператора з навігаційними засобами.

Для кожного проходу f маємо три часові поля віконних оцінок [274]:

$$\left\{H_{f,j}\right\}_{j\in W_f}, \left\{D_{f,j}\right\}_{j\in W_f}, \left\{K_{f,j}\right\}_{j\in W_f} \tag{3.150}$$

3.6.6.3. Агрегація на рівні рейсу та підпис проходу

Щоб перейти від локальних віконних оцінок до інтегрального опису проходу, для кожної метрики $Q \in \{H, D, K\}$ вводяться три агрегати: середнє, стандартне відхилення та максимум.

Середнє значення визначається як:

$$Q_{\text{mean}}(f) = \frac{1}{n_f} \sum_{j\in\mathcal{W}_f} Q_{f,j}\,. \tag{3.151}$$

Стандартне відхилення визначається як

$$Q_{\text{std}}(f) = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{1}{n_f - 1} \sum\limits_{j\in\mathcal{W}_f} \left(Q_{f,j} - Q_{\text{mean}}(f)\right)^2}, & n_f \geq 2 \\ NA, & n_f < 2 \end{cases}. \tag{3.152}$$

За $n_f = 1$ стандартне відхилення $Q_{\text{std}}(f)$ вважається невизначеним, а відповідна компонента не включається до інтегрального згортання.

Максимум за вікнами задається як:

$$Q_{\max}(f) = \max_{j\in\mathcal{W}_f} Q_{f,j}\,. \tag{3.153}$$

У загальному випадку для побудови інтегрального індексу може бути сформований початковий розширений ознаковий підпис рейсу:

$$p_0(f) = \left[p_{HDK}(f), p_{ROT}(f), p_{\kappa}(f), p_{epi}(f), p_{code}(f)\right]^T, \tag{3.154}$$

де $p_{HDK}(f)$ – агрегати Higuchi, DFA та Katz; $p_{ROT}(f)$ – агреговані характеристики кутової швидкості повороту; $p_{\kappa}(f)$ – агрегати кривизни та приростів кривизни; $p_{epi}(f)$ – кількість, тривалість і щільність епізодів; $p_{code}(f)$ – статистики кодів FC-d_1…d_6 та епізодного скорингового індексу.

Остаточний склад ознакового підпису рейсу має визначатися не довільно, а за процедурою формального відбору ознак:

$$p(f) = Select\left(p_0(f), Q_{qual}\right), \tag{3.155}$$

де Q_{qual} – критерій якості або стабільності.

3.6.6.4. Нормування компонент підпису

Оскільки компоненти вектора $\mathbf{p}(f)$ мають різні числові масштаби, перед згортанням вони переводяться до уніфікованої шкали [0,1] за процедурою min–max нормування.

Для довільної компоненти $Z(f)$ вводиться нормована величина:

$$Z_{\text{norm}}(f) = clip\left(\frac{Z(f) - Z_{\min}^{ref}}{Z_{\max}^{ref} - Z_{\min}^{ref} + \varepsilon}, 0{,}1\right), \tag{3.156}$$

де $Z_{\min}^{ref} = \min_{g \in \mathcal{F}} Z(g)$, $Z_{\max}^{ref} = \max_{g \in \mathcal{F}} Z(g)$.

Якщо $Z_{\max} = Z_{\min}$, то приймається $Z_{norm}(f) = 0$, що унеможливлює виродження процедури за константної компоненти.

Параметри $Z_{\min}^{ref}$ і $Z_{\max}^{ref}$ визначаються лише один раз на референтній / навчальній множині $\mathcal{F}$ і надалі не перераховуються під час застосування моделі до нових проходів. Це запобігає витоку інформації між етапом побудови шкали та етапом застосування індексу.

Після цього формується нормований вектор:

$$\mathbf{p}_{\text{norm}}(f) = [p_{1,\text{norm}}(f), \ldots, p_{9,\text{norm}}(f)]^{\text{T}}. \tag{3.157}$$

Нормування є принципово важливим, оскільки дає змогу порівнювати внесок різних агрегатів у формування інтегрального індексу без штучного домінування тих компонент, які спочатку мають більшу числову амплітуду.

3.6.6.5. Експертно-зважене згортання ознакового підпису рейсу та визначення індексу хаотичності $chaos\_score(f)$

Індекс хаотичності $chaos\_score(f)$, що характеризує траєкторну мікроваріативність проходу, визначається як зважене середнє нормованих компонент ознакового підпису:

$$chaos\_score(f) = \frac{\sum_{k=1}^{9} a_k(f) w_k p_{k,\text{norm}}(f)}{\sum_{k=1}^{9} a_k(f) w_k}, \; w_k \geq 0, \tag{3.158}$$

де $a_k(f) = 1$, якщо $p_{k,\text{norm}}(f)$ визначено і $a_k(f) = 0$, якщо ні.

Індикатор $a_k(f)$ забезпечує виключення невизначених компонент із чисельника та знаменника інтегрального згортання. Тому за одного доступного вікна компоненти стандартного відхилення не замінюються нульовими значеннями і не знижують інтегральний індекс мікроваріативності $chaos\_score(f)$.

У базовій реалізації ваги w_k задаються експертно та визначають відносний внесок компонент ознакового підпису у формування $chaos\_score(f)$. Для їх оптимізації за зовнішніми мітками отриманий показник використовується як експертно-зважений індекс хаотичності, що характеризує траєкторну мікроваріативність проходу.

Для переходу до оптимізованої індексної моделі ваги мають визначатися за окремим критерієм якості:

$$\mathbf{w}^* = \arg\max_{\mathbf{w}} Q_{qual}\left(chaos\_score(f, \mathbf{w}), Y_f\right), \tag{3.159}$$

за умов: $w_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^{m} w_k = 1$, де Y_f – зовнішня мітка складності, ризиковості або експертної оцінки проходу, а $Q_{qual}(\cdot)$ – критерій якості ранжування або класифікації. До моменту такої калібрації ваги w_k не слід розглядати як оптимальні або емпірично доведені.

3.6.6.6. Методика калібрування порогів рангової категоризації індексу $chaos\_score(f)$

Калібрування ранг-порогів індексу $chaos\_score(f)$ доцільно виконувати на основі референтної вибірки проходів або зовнішньо валідованих ризикових міток. Загалом, поріг θ може визначатися за емпіричною функцією розподілу, квантилем референтного корпусу даних або

за критерієм найкращого розділення проходів із різними рівнями складності чи ризику.

Такий підхід дає змогу інтерпретувати індекс як інструмент попереднього ранжування проходів за рівнем траєкторної мікроваріативності. Фактичні розподіли $chaos\_score(f)$, $confidence\_index(f)$ та їх експериментальна інтерпретація за корпусом AIS/ECDIS-проходів подаються у розділі 6, де цей індекс перевіряється як елемент експериментальної верифікації фрактально-епізодного апарату.

3.6.7. Комплементарний індекс впевненості $confidence\_index(f)$ та інтерпретаційні пороги

На відміну від $chaos\_score(f)$, який інтерпретується як міра нестабільності, $confidence\_index(f)$ подає той самий стан системи в позитивно інтерпретованій шкалі – як інверсне подання рівня траєкторної мікроваріативності.

Для практичної інтерпретації введемо порогову шкалу:

$$Ranc(f)=\begin{cases} A, & chaos\_score(f)\ge \phi_1, \\ B, & \phi_2 \le chaos\_score(f) < \phi_1, \\ C, & \phi_3 \le chaos\_score(f) < \phi_2, \\ D, & chaos\_score(f) < \phi_3. \end{cases} \tag{3.160}$$

$$1 \ge \phi_1 > \phi_2 > \phi_3 \ge 0 .$$

Значення ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 можуть задаватися одним із трьох способів: як експертні інтервали, як квантилі референтної вибірки або як пороги, відкалібровані за зовнішніми мітками.

Практичний сенс цих порогів полягає в тому, що в сценаріях інтелектуального портового або берегового моніторингу низькі значення $confidence\_index(f)$ можуть використовуватися для попереднього відбору проходів, що потребують додаткового аналізу, перевірки процедур, оперативного розбору проходу [8] або аналізу взаємодії оператора з HMI.

3.6.8. Кореляційна структура ознакового підпису рейсу

Для перевірки внутрішньої узгодженості побудованого простору ознак на рівні рейсу розглянемо кореляційні зв'язки між:

–агрегованими фрактальними показниками,

–інтегральними індексами $chaos\_score(f)$ та $confidence\_index(f)$,

–показником віконного покриття $n_{windows}(f)$.

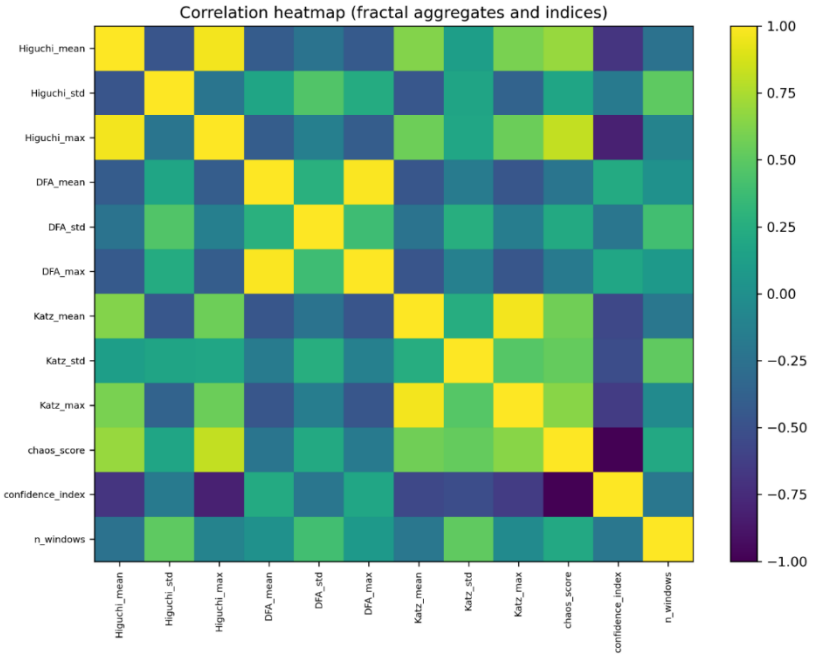


Рисунок 3.10. Кореляційна теплова карта агрегованих фрактальних показників, індексів $chaos\_score(f)$, $confidence\_index(f)$ та показника віконного покриття n_{windows} на рівні рейсу

Кореляційна теплова карта використовується для внутрішньої діагностики простору ознак, виявлення їх потенційного дублювання та перевірки залежності індексу від кількості доступних вікон. Змістова валідація $chaos\_score(f)$ здійснюється окремо за зовнішніми експертними, ризиковими й операційними мітками.

Рисунок 3.10 відображає кореляційну співзмінність між агрегованими ознаками, індексною шкалою та показником віконного покриття. Тому результати теплової карти слід використовувати як діагностичний інструмент для виявлення дублювання ознак, надмірної залежності індексу від окремих

компонентів і попередньої перевірки внутрішньої узгодженості простору ознак. Остаточна оцінка валідності індексу потребує порівняння із зовнішніми ризиковими або експертними мітками.

Таким чином, етап побудови індексної моделі завершується формуванням:

–формального ознакового підпису рейсу $\mathbf{p}(f)$,

–нормованого вектора $\mathbf{p}_{norm}(f)$,

–індексу хаотичності $chaos\_score(f)$,

–комплементарного індексу впевненості $confidence\_index(f)$,

–інтерпретаційної порогової шкали для пріоритетного ранжування і моніторингу.

Однак для того, щоб $chaos\_score(f)$ відображав траєкторні характеристики мікроваріативності керування, а не ознаки телеметрії, необхідно забезпечити надійність вхідних ІСНЗ-траєкторій. Саме тому наступним етапом вводиться контроль якості треків на основі міжточкових відстаней і правил виявлення просторових «стрибків».

3.7. Контроль якості ІСНЗ-треків для ризик-орієнтованої валідації

3.7.1. Необхідність контролю якості

ІСНЗ-дані реальних проходів можуть містити пропуски, помилки синхронізації часу, некоректні координати та стрибкоподібні просторові зміщення між географічно віддаленими точками. Для побудови індикаторів мікроваріативності це критично, оскільки фрактальні оцінки та агрегати стандартного відхилення й максимуму дуже чутливі до різких спотворень сигналу. Без контролю якості такі прояви можуть бути хибно інтерпретовані як нестабільність керування, підвищена траєкторна мікроваріативність, що потребують зовнішньої перевірки.

Тому на цьому етапі вводиться автоматизований критерій типу розрідженості та стрибків, який відсікає траєкторії з надмірними

просторовими розривами і гарантує, що $chaos\_score(f)$ описує траєкторну мікродинаміку руху судна, а не дефекти телеметрії [49].

3.7.2. Виявлення просторових стрибків за формулою гаверсинуса

Нехай дві послідовні точки траєкторії мають координати (φ_{i-1}, λ_{i-1}) та (φ_i, λ_i), задані у радіанах.

Тоді:

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i-1},\ \Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_{i-1}. \tag{3.161}$$

Допоміжна величина формули гаверсинуса визначається як:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_{i-1})\cos(\varphi_i)\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right). \tag{3.162}$$

Відстань між сусідніми точками дорівнює

$$d_i = 2R\arcsin\left(\sqrt{a}\right),\ R = 6371\text{km}. \tag{3.163}$$

Для треку f з N_f точок формується множина міжточкових відстаней $\{d_i\}_{i=2}^{N_f}$

Терміном «стрибок» позначається ситуація, коли міжточкова відстань перевищує заданий поріг якості: $d_i > \Delta_{QC}$.

У даному дослідженні застосовується фіксоване значення

$$\Delta_{QC} = 15,\ \beta = 0{,}5. \tag{3.164}$$

3.7.3. Частка «поганих» сегментів та правило автоматичного виключення

Для формального опису просторових стрибків вводиться індикаторна функція:

$$\mathbf{J}\left(d_i > \Delta_{QC}\right) = \begin{cases} 1,\ d_i > \Delta_{QC}, \\ 0,\ d_i \le \Delta_{QC}. \end{cases} \tag{3.165}$$

Тоді частка сегментів зі «стрибками» для треку f визначається як:

$$\text{frac\_bad}(f) = \frac{1}{N_f - 1}\sum_{i=2}^{N_f}\mathbf{J}\left(d_i > \Delta_{QC}\right). \tag{3.166}$$

Після цього трек f маркується як непридатний для подальшого аналізу, якщо виконується хоча б одна з умов:

1. недостатня кількість точок: $N_f < 3$;

2. домінування стрибків: $\text{frac\_bad}(f) > \beta$.

Звідси випливає, що траєкторія виключається, якщо більше половини її сегментів є просторово аномальними або якщо вона не містить навіть мінімальної кількості точок для фізично осмисленого опису руху.

Інтерпретація порогів така. Значення Δ_{QC} = 8 м. милі (~15 км) відсікає просторові зміщення, які є малоймовірними для послідовних AIS-спостережень у типових режимах передачі. Значення $\beta = 0{,}5$ означає, що якщо більшість сегментів містить «стрибки», траєкторія не відображає фізично узгодженого процесу руху і не може бути використана для аналізу мікроваріативності керування.

3.7.4. Діагностичні показники якості треку

Окрім бінарного рішення «придатний / непридатний», для аудиту якості та пояснення причин виключення використаємо додаткові діагностичні метрики.

Максимальний просторовий розрив визначається як:

$$\max\_\text{jump}(f) = \max_{2 \le i < N_f} d_i . \tag{3.167}$$

Робастна характеристика початку траєкторії задається як.

$$\text{p95\_jump}(f) = Q_{0,95}\left(\{d_i\}_{i=2}^{N_f}\right). \tag{3.168}$$

Середній міжточковий розрив визначається як.

$$\text{mean\_jump}(f) = \frac{1}{N_f - 1}\sum_{i=2}^{N_f} d_i . \tag{3.169}$$

У сукупності ці показники дозволяють розрізняти:

–одиночний великий розрив, коли великим є max_jump, але помірними залишаються p95_jump та mean_jump;

–систематичні розриви в даних, коли підвищеними є і p95_jump, і mean_jump.

У контексті людського фактора і людино-машинного інтерфейсу це принципово, оскільки дає змогу відмежувати показники спостереження від реальної нестабільності траєкторної реалізації керування або особливостей траєкторної динаміки [27], зумовлених режимом керування оператором або зовнішніми умовами [18].

3.7.5. Процедура контролю якості та його роль у загальному конвеєрі

У згорнутому вигляді процедура контролю якості для кожного рейсу f включає:

1. обчислення міжточкових відстаней d_i за формулою гаверсинуса;
2. визначення частки аномальних сегментів frac_bad(f);
3. автоматичне виключення треку, якщо $N_f < 3$ або frac_bad(f) > β;
4. обчислення діагностичних метрик $\max\_\text{jump}(f)$, $\text{p95\_jump}(f)$, $\text{mean\_jump}(f)$.

Цей крок виконує роль контуру контролю надійності для всього конвеєра обробки: він гарантує, що подальші фрактальні агрегати та інтегральні індекси відображають траєкторні особливості реалізації керування, а не дефекти телеметричних записів.

Підсумкова кількість автоматично виключених треків повинна бути відображена у загальній характеристиці сукупності даних (див. табл. 3.12), що забезпечує прозорість формування фінальної вибірки для статистичної валідації.

3.7.6. Підсумок етапу та перехід до статистичної валідації

Отже, побудована модель $chaos\_score(f)$ забезпечує інтерпретовану шкалу мікроваріативності керування, а контроль якості ІСНЗ-даних гарантує, що цей індекс не є ознакою просторових стрибків у телеметрії.

Робастний аналіз на підмножині проходів із достатнім віконним покриттям:

$$\mathcal{F}_{\geq 3} = \left\{ f \in \mathcal{F} : n_{windows}(f) \geq 3 \right\}, \tag{3.170}$$

що додатково підсилює надійність подальших висновків і відповідає інженерному принципу: рішення на основі індексу є статистично стабільнішими за достатнього покриття локальними віконними оцінками.

У результаті у межах цього фрагмента сформовано повний механізм:

–побудови track–підпису проходу;

–нормування компонент до спільної шкали;

–зваженого згортання в $chaos\_score(f)$;

–переходу до $confidence\_index(f)$;

–відсікання телеметрично дефектних треків.

Усе це створює основу для наступного етапу – ризик-орієнтованої статистичної валідації індексної моделі, де перевіряється чи розділяє $chaos\_score(f)$ групи $risk\_level$, чи має монотонний зв'язок із $severity\_cod$, і чи зберігаються основні висновки на робастній підмножині даних.

3.8. Формування протоколу ризик-орієнтованої статистичної валідації індексу хаотичності – впевненості за траєкторіями руху судна

Для подальшої експериментальної перевірки прикладної змістовності інтегрального індексу $chaos\_score(f)$ необхідно зіставити його з незалежними ризик-орієнтованими або експертними атрибутами. У межах цього підрозділу подається протокол про виконання такої перевірки. Його призначення полягає у визначенні послідовності статистичних процедур, за допомогою яких можна оцінити, чи розрізняє індекс $chaos\_score(f)$ групи проходів із різним рівнем ризику та чи має він монотонний зв'язок із порядковою шкалою суворості.

3.8.1. Геометрична оцінка роздільної здатності агрегованих фрактальних сигнатур

Перед застосуванням формальних непараметричних тестів доцільно виконати попередню геометричну оцінку структури простору ознак. Для цього агреговані ознакові підписи проходів можуть бути спроєктовані у простір перших двох головних компонент (principal component analysis, PCA) [331]. Така процедура дає змогу попередньо оцінити, чи існує в просторі ознак тенденція до розмежування проходів за зовнішніми категоріями *risk_level*.

PCA-проєкція в цьому контексті використовується як допоміжний інструмент для візуальної діагностики. Її функція полягає у попередньому виявленні структури даних перед застосуванням формальних критеріїв.

3.8.2. Описова статистика індексів за рівнями ризику

Наступним етапом протоколу є розрахунок описової статистики *chaos_score* та *confidence_index* у групах, заданих зовнішньою змінною *risk_level*. Для кожної групи доцільно визначати кількість проходів, середнє значення, медіану, стандартне відхилення, квартилі, а також мінімальні та максимальні значення індексів.

Таке подання дає змогу попередньо оцінити напрям зміщення центральних тенденцій між групами ризику. Фактичні числові значення описової статистики для корпусу AIS/ECDIS-проходів подано у розділі 6 разом із результатами експериментальної верифікації.

3.8.3. Глобальна перевірка міжгрупових відмінностей

Для перевірки нульової гіпотези про однаковість розподілів *chaos_score* у групах Low, High і Critical застосовується критерій Краскела-Волліса [332]. Нехай G – кількість груп, n_g – обсяг g-ї групи, R_g – сума рангів у цій групі, а N – загальна кількість спостережень. Тоді статистика критерію має вигляд:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{g=1}^{G} \frac{R_g^2}{n_g} - 3(N+1). \tag{3.171}$$

За достатньо великого N величина H апроксимується розподілом χ^2 зі ступенями вільності $G - 1$. Статистично значуще значення H свідчить про те, що принаймні дві групи відрізняються за рівнем *chaos_score*.

Далі виконуються парні порівняння за критерієм Манна-Вітні [333]. Для двох груп з обсягами n_1 і n_2, а також сумою рангів першої групи R_1, статистика визначається як:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1,\ U_2 = n_1 n_2 - U_1. \tag{3.172}$$

Цей тест дає змогу перевірити, чи має одна група систематично більші значення *chaos_score*, ніж інша.

Для оцінювання монотонного зв’язку між *chaos_score* та порядковою змінною *severity_code* застосовується коефіцієнт рангової кореляції Спірмена [335]. У випадку відсутності значної кількості зв’язок його можна подати як:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{N} d_i^2}{N\left(N^2 - 1\right)}, \tag{3.173}$$

де d_i – різниця між рангами двох змінних для i-го спостереження. Додатне значення ρ означає тенденцію до зростання *chaos_score* зі збільшенням суворості коду ризику.

3.8.4. Візуальні засоби контролю міжгрупових зсувів

Для допоміжної інтерпретації результатів описової статистики та непараметричних тестів можуть застосовуватися boxplot- і violin-діаграми. Boxplot-діаграми дозволяють порівняти медіани, міжквартильні інтервали та викиди chaos_score у групах ризику. Violin-діаграми додатково відображають форму розподілу confidence_index або chaos_score у кожній групі.

Ці графічні засоби мають допоміжний характер: вони дозволяють виявити перекриття розподілів, асиметрію, локальну концентрацію значень та гетерогенність навігаційних сценаріїв. Фактичні графічні результати застосування цього протоколу до корпусу AIS/ECDIS-проходів наведено в розділі 6.

3.8.5. Інтерпретація дуже малих *p*-значень і оцінка сили ефекту

За великих обсягів вибірки статистичні тести мають високу потужність, тому навіть помірні міжгрупові відмінності можуть супроводжуватися дуже малими p-значеннями. У зв’язку з цим інтерпретація результатів валідації не повинна обмежуватися лише фактом статистичної значущості. Необхідно додатково оцінювати силу ефекту, тобто практичну виразність відмінностей між групами.

Для критерію Краскела-Волліса зручно використовувати показник:

$$\varepsilon^2 = \frac{H - G + 1}{N - G}, \tag{3.174}$$

де G – кількість груп. Величина ε^2 відображає частку варіації рангового розподілу *chaos_score*, яку можна віднести до групової належності.

Для парного тесту Манна-Вітні може застосовуватися рангово-бісеріальна кореляція:

$$r_{rb} = 1 - \frac{2U}{n_1 n_2}, \tag{3.175}$$

або еквівалентний показник імовірності переваги A_{12} Варги-Делані [334]

$$A_{12} = \frac{U}{n_1 n_2}, \tag{3.176}$$

яка інтерпретується як імовірність того, що випадкове значення *chaos_score* з однієї групи перевищить значення з іншої. Така оцінка дає змогу перейти від формальної статистичної значущості до практичної інтерпретації роздільної здатності індексу.

Таким чином, підрозділ 3.8 визначає протокол ризик-орієнтованої статистичної валідації індексу мікроваріативності. Числові значення описової статистики, результати критеріїв Краскела-Волліса, Манна-Вітні, коефіцієнта Спірмена, графічні розподіли та їх інтерпретація за корпусом AIS/ECDIS-проходів подаються у розділі 6.

3.9. Робастний контроль та обмеження валідації фрактально-епізодного методу

3.9.1. Необхідність робастного контролю індексу *chaos_score*

Інтегральний індекс мікроваріативності *chaos_score* формується на основі агрегування локальних фрактальних оцінок, отриманих у ковзних вікнах. Тому надійність його інтерпретації залежить не лише від значень самих фрактальних показників, а й від кількості доступних вікон $n_{\text{windows}(f)}$, за якими виконується агрегація для конкретного проходу *f*.

Особливо чутливими до недостатнього віконного покриття є агрегати типу стандартного відхилення та максимуму, оскільки за малої кількості вікон вони можуть відображати не стійку структуру мікроваріативності проходу, а випадковий локальний сплеск або особливість короткого фрагмента траєкторії. У зв’язку з цим у методиці вводиться додаткове правило робастного контролю, яке визначає достатність віконного покриття та придатність *chaos_score* до подальшої статистичної й прикладної інтерпретації.

Для цього визначається підмножина проходів із достатнім віконним покриттям:

$$\Phi_{\geq 3} = \{ f \in \Phi : n_{windows}(f) \geq 3 \} \tag{3.177}$$

Поріг $n_{\text{windows}(f)} \geq 3$ використовується як мінімальна умова для більш стійкого оцінювання варіабельності локальних фрактальних показників. Це пов'язано з тим, що вибіркове стандартне відхилення для віконних агрегатів визначається як:

$$Q_{std}(f) = \sqrt{\frac{1}{n_f - 1} \sum_{j=1}^{n_f} \left(Q_{f,j} - \bar{Q}_f \right)^2} . \tag{3.178}$$

За $n_f = 2$ ступінь вільності дорівнює одиниці, тому оцінка розкиду є надмірно чутливою до одиничної флуктуації. За $n_f \geq 3$ формується мінімальна основа для більш надійного опису варіабельності та пікових проявів у межах проходу. Отже, умова $n_{\text{windows}(f)} \geq 3$ використовується як методичний критерій достатнього покриття.

3.9.2. Індикатор достатності віконного покриття

У загальній процедурі обробки кожному проходу може бути поставлений у відповідність індикатор достатності віконного покриття:

$$I_{robust}(f) = \begin{cases} 1, & n_{windows}(f) \geq 3, \\ 0, & n_{windows}(f) < 3. \end{cases} \tag{3.179}$$

Значення $I_{\text{robust}(f)} = 1$ означає, що індекс *chaos_score* для відповідного проходу має достатнє віконне покриття для подальшої статистичної перевірки, міжгрупового порівняння або експертної інтерпретації. Значення $I_{\text{robust}(f)} = 0$ вказує на необхідність обережної інтерпретації результатів і небажаність використання такого проходу як окремого доказового спостереження.

Таким чином, робастний контроль виконує три функції. По-перше, він відокремлює значення *chaos_score* від індикатора достатності віконного покриття. По-друге, він зменшує ризик помилкової інтерпретації коротких або слабко покритих проходів як стійких проявів траєкторної нестабільності. По-третє, він створює основу для повторної перевірки статистичних висновків на підмножині $\Phi_{k \geq 3}$.

У межах Розділу 3 зазначене правило розглядається як методичний елемент побудови фрактально-епізодного апарату. Фактична кількість проходів у робастній підмножині, описові статистики *chaos_score* і *confidence_index*, повторна непараметрична перевірка та порівняння результатів із повною вибіркою подаються у розділі 6 як частина експериментальної верифікації запропонованої індексної моделі.

3.9.3. Валідація та обмеження фрактально-епізодної послідовності обробки

Наведені в попередніх підрозділах ілюстрації демонструють технічну працездатність запропонованого конвеєра: від зчитування і нормалізації ІСНЗ-траєкторій до побудови локальних фрактальних показників, виділення епізодів підвищеної мікроваріативності, формування кодів і розрахунку інтегральних індикаторів.

Для коректного застосування методу необхідно розрізняти три рівні валідації.

Перший рівень – технічна валідація підходу. На цьому рівні перевіряється, чи коректно виконуються операції нормалізації, згладжування, обчислення похідних, побудови ковзних вікон, фрактальних метрик та агрегації епізодів. Така перевірка підтверджує працездатність програмної реалізації.

Другий рівень – порівняльна методична валідація. На цьому рівні результати фрактально-епізодного аналізу мають порівнюватися з базовими альтернативами: класичними кінематичними показниками, статистичними характеристиками XTE і ROT, простими пороговими детекторами, кластеризацією за геометричними ознаками траєкторії або іншими методами виявлення локально складних фрагментів руху.

Третій рівень – зовнішня змістовна валідація. На цьому рівні перевіряється, чи узгоджуються виділені епізоди та інтегральні індекси з незалежними джерелами інформації: експертною розміткою складних маневрів, журналами маневрів, даними про режим автопілота, тренажерними

сценаріями, гідрометеорологічними умовами, типом ділянки маршруту або фактичними подіями навігаційного ризику.

Лише після проходження другого і третього рівнів перевірки результати можуть інтерпретуватися не лише як внутрішні індикатори траєкторної мікроваріативності, а як ознаки, пов'язані з ризиком, особливостями керування або людським фактором.

3.9.4. Узагальнення ролі робастного контролю в структурі розділу

Робастний контроль полягає у введенні додаткового методичного фільтра достатності віконного покриття, який дає змогу відрізняти проходи з достатнім віконним покриттям від коротких або траєкторних фрагментів із недостатнім віконним покриттям. Це особливо важливо для тих компонент індексної моделі, які залежать від розкиду, пікових значень і локальної нерегулярності фрактальних оцінок.

Отже, у межах розділу 3 сформовано правило робастного контролю, яке визначає умови достатнього віконного покриття та придатність *chaos_score* до подальшої статистичної інтерпретації. Повна числова реалізація робастного контролю, включаючи характеристики підмножини $\Phi_{\geq 3}$, повторні непараметричні тести та порівняння з повною вибіркою, наведена у розділі 6.

3.10. Висновки до Розділу 3

У третьому розділі розроблено концептуальні засади фрактально-епізодного аналізу ІСНЗ-траєкторій, спрямовані на виявлення мікроваріативності руху судна, формування похідних траєкторних індикаторів керування та побудову простору ознак для подальшої ризик-орієнтованої або поведінкової інтерпретації [247]. На відміну від підходів, у яких траєкторія розглядається переважно як цілісний геометричний об'єкт або як носій окремих кінематичних ознак, у цьому розділі запропоновано перехід до багатомасштабного епізодно-орієнтованого аналізу локальної структури руху з подальшою агрегацією результатів у фрактально-динамічну сигнатуру рейсу.

Основні результати розділу полягають у наступному:

1. Розроблено процедуру нормалізації різноформатних ІСНЗ-траєкторій із зведенням координатних, часових і кінематичних параметрів до єдиного метричного подання. Уточнено, що реальні часові мітки мають зберігатися як основна шкала аналізу, а медіанний крок дискретизації використовується як номінальний параметр контролю регулярності даних.

2. Сформовано систему фрактальних і динамічних показників, що описують локальну нерегулярність, поперечну мікроваріативність, змінність курсу, кутову швидкість повороту та просторову складність траєкторії. Показано, що ці ознаки утворюють похідний траєкторний опис руху судна.

3. Запропоновано метод виявлення епізодів підвищеної фрактальної активності на основі ковзних вікон і квантильного порога. Уточнено, що квантильний детектор виділяє відносно найбільш нерегулярні фрагменти в межах рейсу.

4. Розроблено процедуру агрегації активних вікон в епізоди мікроваріативності з урахуванням параметрів Δgap і T_{min}. Обґрунтовано необхідність контролю параметричної стійкості результатів за кількістю епізодів, їх тривалістю, просторовою локалізацією та положенням пікових точок.

5. Побудовано фрактально-динамічний опис епізодів і допоміжний код FC-$d_1 \ldots d_6$. Уточнено, що цей код є інтерпретаційним дискретним шаром. Основні статистичні порівняння, кластеризація та оцінювання подібності мають виконуватися насамперед у нормованому безперервному просторі ознак.

6. Сформовано ризик-орієнтований індекс епізодної складності, який поєднує фрактально-динамічні та контекстні характеристики епізоду. Встановлено, що для зовнішньої калібрації цей індекс має статус евристичного скорингового показника складності й напруженості траєкторної реалізації.

7. Побудовано інтегральний індекс хаотичності *chaos_score*, що характеризує траєкторну мікроваріативність проходу, та його комплементарне подання *confidence_index* = 1 – *chaos_score*.

8. Визначено обмеження кореляційних теплових карт як інструменту внутрішньої діагностики простору ознак.

9. Обґрунтовано необхідність подальшої зовнішньої валідації методу шляхом порівняння з базовими кінематичними й статистичними підходами, експертною розміткою, тренажерними сценаріями, журналами маневрів та перевіркою узагальнюваності між суднами, маршрутами й навігаційними умовами.

Отже, науковий результат Розділу 3 полягає в побудові формалізованого інструментарію для перетворення ІСНЗ-траєкторій на багаторівневу систему траєкторних індикаторів мікроваріативності керування судном. Отриманий апарат створює методичну основу для подальшого дослідження станів оператора у розділі 4, ризик-орієнтованої інтерпретації людського фактора у розділі 5 та експериментальної верифікації фрактально-епізодного підходу у розділі 6.

РОЗДІЛ 4. Концептуальні основи інтелектуального оцінювання психофізіологічних станів оператора в задачах забезпечення стійкості ергатичних навігаційних систем

4.1. Формально-геометрична модель розподілу уваги оператора та прогнозування часових станів під час несення навігаційної вахти

У межах цього розділу предметом ідентифікації є не безпосередньо приховані психофізіологічні стани оператора, а їхні спостережувані та розрахункові прояви в ергатичній системі навігаційного забезпечення. Когнітивні, часові, функціональні та поведінкові стани оператора розглядаються як латентні змінні, що оцінюються через сукупність непрямих ознак: розподіл уваги між інформаційними каналами, часові затримки, повторні звернення до засобів навігаційного контролю, зміна послідовності дій, параметри руху судна та контекст навігаційної ситуації.

Загальна логіка ідентифікації у розділі має вигляд:

стан оператора → спостережувані ознаки → модель ідентифікації → прогноз → керувальна дія.

Формально це можна подати як послідовність відображень:

$$X(t) \to Z(t) \to \hat{S}(t) \to \hat{R}(t+\Delta t) \to U_{rec}(t), \qquad (4.1)$$

де $X(t)$ – первинні навігаційні дані, часово-поведінкові ознаки та результати спостереження за діями оператора;

$Z(t)$ – вектор нормованих ознак;

$\hat{S}(t)$ – оцінений функціональний стан оператора;

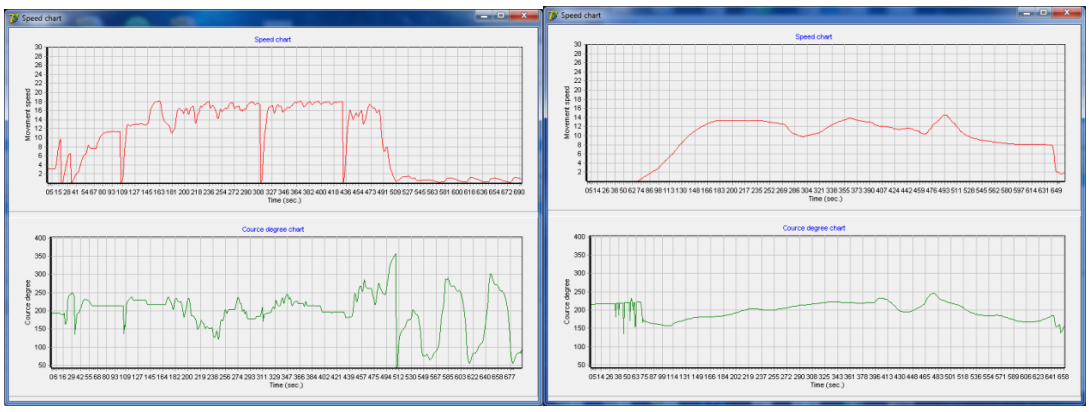
$\hat{R}(t+\Delta t)$ – прогнозований рівень ризику або критичності ситуації;

$U_{rec}(t)$ – рекомендована або можлива керувальна дія.

У такій постановці увага, дисторсія суб’єктивного часу, втома, ментально-мотиваційний стан і критична ситуація не ототожнюються між собою. Вони розглядаються як різні рівні аналізу, що пов’язані між собою функціонально, але мають різні джерела даних, різні ознаки та різний рівень достовірності інтерпретації [266].

Відповідно до вимог STCW-78, на оператора під час вахти покладається

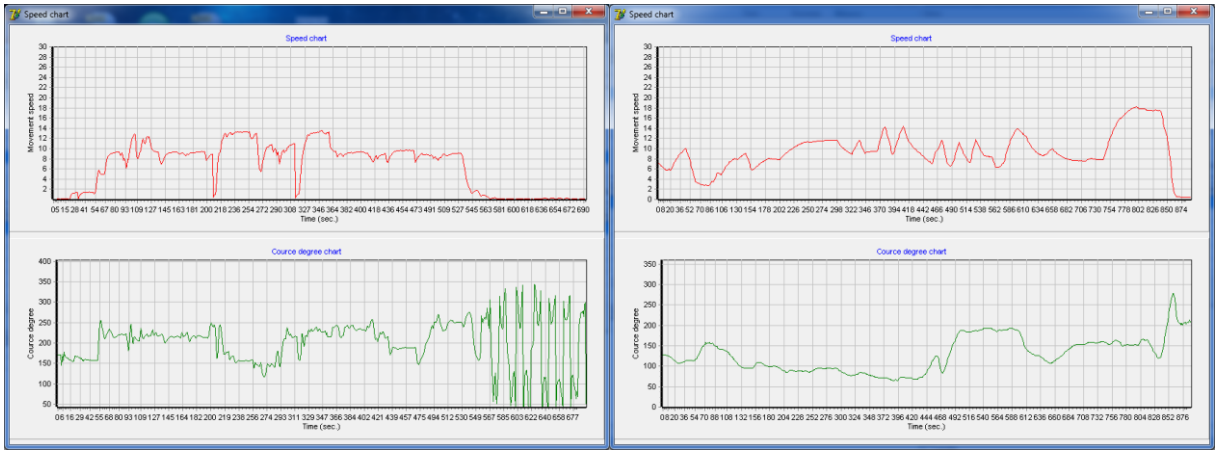
обов’язок безперервного контролю навігаційної ситуації, своєчасного розпізнавання небезпек, оцінювання ризику та реалізації керувальних дій у реальному часі. У складних районах плавання, зокрема у вузькостях, зонах інтенсивного трафіку, за обмеженої видимості та несприятливих гідрометеорологічних умов, саме обмеженість уваги, її нерівномірний розподіл і темпоральні коливання циклу аналізу-дії можуть бути прихованими передумовами зниження безпеки судноводіння [97]. У межах попередніх розділів дисертації обґрунтовано, що людський фактор повинен розглядатися як внутрішній функціональний компонент ергатичного контуру керування, а стан, увага, часові характеристики мікрооперацій та ймовірність помилки – як взаємопов’язані змінні операторського контуру. Саме тому задача формалізації розподілу уваги оператора має не лише психологічне, а й системотехнічне значення, оскільки створює підґрунтя для подальшої ідентифікації когнітивних і психофізіологічних станів у процесах управління рухом судна [325]. Експериментальні дані були отримані з використанням навігаційного тренажера Navi-Trainer Professional 5000 (NTPRO 5000, Transas), який дав змогу встановити наявність стійких індивідуальних відмінностей у часово-поведінкових характеристиках маневрування. Аналіз параметрів швидкості та кута перекладки керма під час проходження складних ділянок показав, що за формально подібних умов, траєкторії, сформовані різними операторами, відрізняються кривизною, часовими характеристиками реакції та структурою циклів аналізу(рис. 4.1).



а б

Рисунок 4.1. Відмінності кривизни траєкторій під час проходження протоки Босфор

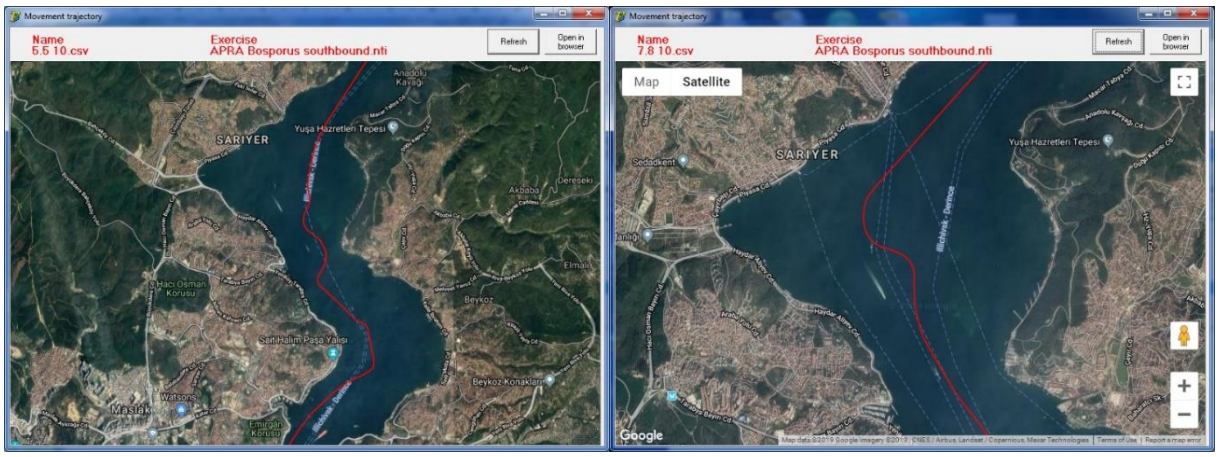
Порівняння маневрів, виконаних тими самими вахтовими складами в іншому районі плавання, підтверджує, що спостережувані відмінності не є випадковими чинниками окремої ситуації, а відображають відносно стійку індивідуальну модель реагування, що реалізується в межах певного діапазону професійної діяльності [323, 325, 336, 337] (рис. 4.2).



а б

Рисунок 4.2. Типова модель поведінки в Гонконзі

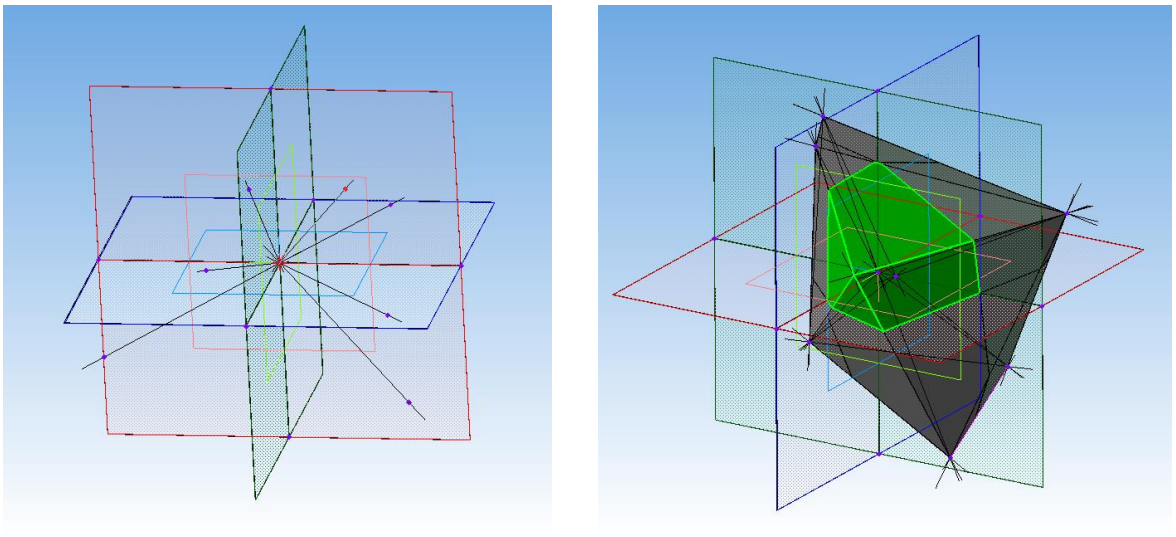
Поряд із мікрорівневими змінами параметрів керування виявлено й макрорівневі відмінності, які виявляються у геометрії фактичної траєкторії руху судна. Це дає підстави трактувати параметри руху судна не лише як результат зовнішньої навігаційної ситуації, а й як непрямі індикатори внутрішнього стану оператора, передусім структури уваги та часової організації процесу прийняття рішень [59, 185] (рис. 4.3).



а б

Рисунок 4.3. Супутникове відображення траєкторій руху судна на макрорівні

Отже, постає задача побудови формальної моделі, яка б дозволила описати логіку розподілу уваги оператора між функціонально значущими об’єктами навігаційної ситуації (рис. 4.4), виявити механізми виникнення часових флуктуацій і сформувати основу для дискретного прогнозування часових станів у циклі несення навігаційної вахти [73, 338, 339].



а б

Рисунок 4.4. Геометрична апроксимація моделі розподілу уваги

Для розв’язання поставленої задачі в підрозділі послідовно розглядаються: розроблення формально-геометричної моделі розподілу уваги оператора; визначення логіки та механізмів перерозподілу уваги в межах моделі; вибір методу прогнозування часових станів; побудова програмного засобу для автоматизованого формування прогнозу.

Ключова вихідна гіпотеза полягає в тому, що увага оператора є обмеженим ресурсом, який не може одночасно з однаковою інтенсивністю спрямовуватися на всі об’єкти навігаційної ситуації. Її обсяг у межах певного інтервалу часу є скінченним і залежить від складності ситуації, досвіду оператора, структури інформаційного поля та рівня функціонального навантаження. Тому збільшення концентрації уваги на одних об’єктах об’єктивно супроводжується її зменшенням щодо інших об’єктів, що може призвести до появи локальних зон неповного опрацювання інформації.

З урахуванням вимог навігаційної вахти та структури інформаційного

поля оператора доцільно виділити вісім операційних каналів уваги, які охоплюють основні джерела навігаційної інформації, комунікації, ситуаційного контролю та керувальної взаємодії на ходовому містку. Для забезпечення відтворюваності моделі кожен канал пов’язується з джерелом даних, спостережуваними ознаками та функціональною роллю в процесі судноводіння (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Операційні канали уваги оператора

Канал	Зміст каналу	Джерело даних	Спостережувані ознаки	Роль у моделі
v_1	Візуальне спостереження	візуальний контроль, відеофіксація, журнал спостережень	тривалість огляду, частота звернень, зміна напряму спостереження	первинне сприйняття навігаційної ситуації
v_2	ECDIS	електронна карта, маршрут, трек, XTE	час роботи, кількість звернень, перевірка маршруту	контроль положення судна та відповідності плану переходу
v_3	RADAR/ARPA	радіолокаційні цілі, CPA/TCPA	частота перевірок, кількість цілей, ризикові події	оцінювання небезпечного зближення
v_4	AIS	ідентифікаційні дані цілей	кількість перевірених об’єктів, повторні звернення	уточнення характеристик навколишнього трафіку
v_5	VHF-комунікація	переговори, команди, підтвердження	кількість і тривалість повідомлень, затримки відповіді	координація з іншими суднами та службами
v_6	Органи керування	автопілот, штурвал, машинний телеграф	кількість дій, затримки, повторні корекції	реалізація керувального впливу
v_7	Навігаційне середовище	видимість, трафік, погода, навігаційні обмеження	кількість активних факторів, складність району	ситуаційний контекст прийняття рішень
v_8	Командна взаємодія	дії вахти, команди, підтвердження	час реакції, узгодженість дій, повторні уточнення	колективний контур підтримки прийняття рішень

Вибір зазначених каналів уваги має прикладний характер і відповідає основним джерелам інформації та керувальним діям на ходовому містку. За наявності додаткових даних структуру каналів можна розширити або

уточнити, однак усі канали мають оцінюватися за єдиним принципом нормованого внеску у розподіл уваги.

$$v_i \Rightarrow \{D_i, O_i(t), N_i(\cdot), w_i(t)\}, \tag{4.2}$$

$$O_i(t) = \left(f_i(t), \tau_i(t), n_i(t), d_i(t) \right), \tag{4.3}$$

$$O_i(t) \xrightarrow{N_i(\cdot)} O_i^*(t), \tag{4.4}$$

$$O_i^*(t) = \left(f_i^*(t), \tau_i^*(t), n_i^*(t), d_i^*(t) \right), \tag{4.5}$$

де D_i – джерело даних,

$O_i(t)$ – спостережувані ознаки,

$N_i(\cdot)$ – правило нормування,

$w_i(t)$ – нормована вага уваги.

Змістовно ці об’єкти відображають функціонально значущі компоненти операторського контуру, через які оператор здійснює сприйняття, інтеграцію та оцінювання навігаційної обстановки. Чим вищий рівень професійної підготовки та ситуаційної обізнаності, тим повнішим і збалансованішим є охоплення зазначених каналів уваги [199].

Для опису розподілу уваги оператора використовується нормована модель розподілу обмеженого ресурсу уваги між інформаційними та керувальними каналами. Такий підхід є коректнішим для задачі судноводіння, оскільки увага оператора не вимірюється безпосередньо як фізична координата, а оцінюється через частоту, тривалість і послідовність звернень до джерел навігаційної інформації.

$$d : V_{att} \times V_{att} \to \mathbb{R}_+. \tag{4.6}$$

Нехай множина каналів уваги оператора має вигляд:

$$V_{att} = \{v_1, v_2, ..., v_n\} \tag{4.7}$$

де, v_i – i-й інформаційний або керувальний канал.

Для кожного каналу вводиться вага уваги: $w_i(t) \geq 0$, де $w_i(t)$ – частка уваги, спрямована на канал v_i у момент часу t.

Оскільки увага є обмеженим ресурсом, виконується умова нормування:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i(t) = 1. \tag{4.8}$$

Тоді вектор розподілу уваги має вигляд:

$$W(t) = \left(w_1(t), w_2(t), ..., w_n(t)\right) \tag{4.9}$$

$$w_i(t) \geq 0,\ \sum_{i=1}^{n} w_i(t) = 1. \tag{4.10}$$

Невзаємозамінність каналів уваги означає, що кожен канал виконує окрему функцію в інформаційному полі оператора. Проте це не означає статистичної незалежності каналів. Тому в моделі використовується не добуток імовірностей незалежних подій, а нормований розподіл ресурсу уваги.

$$W(t) = \frac{\left(g_1(t), g_2(t), ..., g_n(t)\right)}{\sum_{k=1}^{n} g_k(t)},\ w_i(t) = \frac{g_i(t)}{\sum_{k=1}^{n} g_k(t)} > 0,\ \sum_{i=1}^{n} w_i(t) = 1. \tag{4.11}$$

Отже, $g_i(t)$ є інтегральною інтенсивністю залучення каналу v_i, а $w_i(t)$ – нормованою часткою обмеженого ресурсу уваги. Модель не потребує припущення про статистичну незалежність каналів, оскільки вона описує розподіл функціонального ресурсу між інформаційним і керувальним каналами.

Для обчислення ваги уваги $w_i(t)$ кожний канал v_i описується набором спостережуваних ознак:

$$Z_i(t) = \left(f_i(t), \tau_i(t), n_i(t), d_i(t)\right), \tag{4.12}$$

де $f_i(t)$ – частота звернень до каналу;

$\tau_i(t)$ – сумарна тривалість роботи з каналом;

$n_i(t)$ – кількість перемикань уваги до відповідного каналу;

$d_i(t)$ – ситуаційна значущість каналу у поточній навігаційній ситуації.

Після нормування цих ознак інтенсивність залучення каналу визначається як:

$$g_i(t) = \alpha_f f_i^*(t) + \alpha_\tau \tau_i^*(t) + \alpha_n n_i^*(t) + \alpha_d d_i^*(t), \tag{4.13}$$

де $f_i^*(t)$, $\tau_i^*(t)$, $n_i^*(t)$, $d_i^*(t)$ – нормовані значення відповідних ознак.

Для коефіцієнтів виконується умова:

$$\alpha_f + \alpha_\tau + \alpha_n + \alpha_d = 1,\ \alpha_f, \alpha_\tau, \alpha_n, \alpha_d \geq 0. \tag{4.14}$$

Тоді вага уваги каналу визначається як:

$$w_i(t) = \frac{g_i(t)}{\sum_{k=1}^{n} g_k(t)} \tag{4.15}$$

Для узагальнення каналів уваги за типом сприйняття кожному каналу v_i ставиться у відповідність вектор модальностей:

$$m_i = \left(m_i^{vis}, m_i^{aud}, m_i^{mot}\right) \tag{4.16}$$

де m_i^{vis} – візуальна складова;

m_i^{aud} – слухова або комунікаційна складова;

m_i^{mot} – моторно-керувальна складова.

Компоненти вектора задовольняють умову:

$$0 \le m_i^{vis}, m_i^{aud}, m_i^{mot} \le 1. \tag{4.17}$$

Тоді поточне навантаження за модальностями визначається як:

$$L_{vis}(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i(t) m_i^{vis},\ L_{aud}(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i(t) m_i^{aud},\ L_{mot}(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i(t) m_i^{mot} \tag{4.19}$$

У векторній формі:

$$L(t) = \left(L_{vis}(t), L_{aud}(t), L_{mot}(t)\right) \tag{4.20}$$

Дисбаланс навантаження між модальностями означає зниження повноти ситуаційної обізнаності, підвищення ймовірності помилки та зростання ризику переходу системи до небезпечного режиму функціонування.

Таким чином, контроль розподілу уваги є не допоміжною, а принципово значущою процедурою забезпечення безпеки судноводіння. За відсутності такого контролю дисбаланс інформаційного охоплення може призвести до пропуску навігаційних небезпек, помилкового оцінювання обстановки та несвоєчасного прийняття керувального рішення.

Однак для задач навігаційного забезпечення недостатньо лише зафіксувати статичну конфігурацію розподілу уваги. Не менш важливо оцінити її темпоральну організацію, тобто часовий цикл, у межах якого оператор переходить від сприйняття ситуації до оцінювання ризику, вибору стратегії та реалізації дії. Саме часові коливання такого циклу можуть бути раннім індикатором напруженості, перевантаження або зміни функціонального стану.

З цією метою виділено п’ять часових станів, що характеризують логіку операторського циклу під час виконання навігаційних завдань: 1 – оцінка навігаційної ситуації; 2 – оцінювання ризиків і можливостей їх уникнення; 3 – визначення стратегії маневрування; 4 – вироблення послідовності дій у режимі реального часу; 5 – виконання маневру.

Оскільки послідовність переходів між зазначеними станами має стохастичний характер і залежить від структури навігаційної ситуації, для прогнозування тривалості перебування у станах і часових інтервалів переходів доцільно використати марківський процес із дискретним простором станів і неперервним часом. У такій моделі дискретними є фази операторського циклу, а неперервним – час перебування оператора в кожній фазі. Це дає змогу описати не лише сам факт переходу між станами, а й інтенсивність таких переходів, тобто швидкість зміни фаз діяльності оператора під впливом навігаційної ситуації, рівня навантаження та складності прийняття рішень.

Для практичного використання марківської моделі необхідно задати процедуру ідентифікації інтенсивностей переходів λ_{ij} за експериментальними даними. Джерелом таких даних є часові послідовності дій оператора, зареєстровані під час тренажерних або натурних спостережень на судні: моменти переходу від аналізу ситуації до оцінювання ризику, від оцінювання ризику до вибору стратегії, від вибору стратегії до формування послідовності дій та від неї до виконання маневру. Кожний часовий інтервал розмічається одним зі станів $S_1,\ldots,S_5$, після чого для кожного стану S_i визначається сумарний час перебування T_i та кількість переходів N_{ij} зі стану S_i до стану S_j.

Оцінка інтенсивності переходу зі стану S_i до стану S_j задається співвідношенням: $\lambda_{i,j} = \dfrac{N_{i,j}}{T_i},\ i \neq j$, де N_{ij} – кількість зафіксованих переходів зі стану S_i до стану S_j у вибірці спостережень;

T_i – сумарний час перебування системи у стані S_i.

Діагональні елементи матриці інтенсивностей визначаються як:

$$\lambda_{ij} = -\sum_{j=1,\ j\neq i}^{5} \lambda_{ij}\,. \qquad (4.21)$$

У результаті формується матриця інтенсивностей переходів Λ, яка є генератором марківського процесу з неперервним часом.

$$Q \equiv \Lambda = \left\{\lambda_{ij}\right\}_{i,j=1}^{5}. \qquad \lambda_{ij} \geq 0,\ i \neq j. \tag{4.22}$$

Якщо експериментальні дані охоплюють різні рівні складності навігаційної ситуації, то доцільно використовувати не одну загальну матрицю Λ, а набір матриць: $\Lambda = \Lambda(c)$, $c \in \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, де c позначає клас ситуації: штатна, ускладнена, напружена або критична. У такому випадку інтенсивності переходів залежать від ситуаційного контексту, а модель набуває умовно-стаціонарного характеру в межах кожного окремого класу ситуацій.

Початковий розподіл ймовірностей $p(0)$ задається залежно від фази операторського циклу, з якої починається прогноз. Якщо прогноз виконується з моменту початку аналізу навігаційної ситуації, то:

$$p_1(0) = 1,\ p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = p_5(0) = 0. \tag{4.23}$$

Якщо спостереження починається в довільний момент часу, початковий розподіл визначається за фактично ідентифікованим станом або за емпіричною частотою перебування у станах у попередньому часовому вікні:

$$p(0) = \left\{p_1(0), p_2(0), p_3(0), p_4(0), p_5(0)\right\},\ \sum_{j=1}^{5} p_i(0) = 1. \tag{4.24}$$

Для прийнятої логіки операторського циклу допускаються такі основні переходи:

$$S_1 \to S_2, S_2 \to S_1, S_2 \to S_3, S_2 \to S_4, S_3 \to S_5, S_4 \to S_5, S_5 \to S_2; \tag{4.25}$$

$$\mathcal{E}_S = \left\{(1,2),(2,1),(2,3),(2,4),(3,5),(4,5),(5,2)\right\}$$
$$\lambda_{ij} > 0 \Leftrightarrow (i,j) \in \mathcal{E}_S,\ i \neq j. \qquad . \tag{4.26}$$
$$\lambda_{ij} = 0 \Leftrightarrow (i,j) \notin \mathcal{E}_S,\ i \neq j.$$

Множина $\mathcal{E}_S$ задає не універсальну структуру поведінки оператора, а базовий граф переходів для прийнятої експериментальної постановки.

Зазначеним переходам відповідає така структура генератора марківського процесу:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} -\lambda_{12} & \lambda_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & -(\lambda_{21}+\lambda_{23}+\lambda_{24}) & \lambda_{23} & \lambda_{24} & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_{35} & 0 & \lambda_{35} \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_{45} & \lambda_{45} \\ 0 & \lambda_{52} & 0 & 0 & -\lambda_{52} \end{vmatrix}. \quad (4.27)$$

Така матриця не задає універсальної схеми для всіх можливих навігаційних ситуацій, а відображає базовий цикл прийняття рішень у межах обраної експериментальної постановки. За наявності додаткових переходів, наприклад, повернення від виконання маневру до повторного аналізу ситуації або прямого переходу від оцінки ризику до виконання дії, структура матриці може бути розширена відповідно до емпіричних даних.

Позначимо ймовірність перебування системи у стані S_i у момент часу t як $p_i(t)$. Тоді для всіх моментів часу виконується умова нормування:

$$\sum_{i=1}^{5} p_i(t) = 1, \;\; p_i(t) \geq 0. \quad (4.28)$$

Імовірність переходу зі стану S_i до стану S_j за малий часовий інтервал Δt визначається через інтенсивність переходу:

$$\lambda_{i,j} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (4.29)$$

Динаміка ймовірностей станів описується системою рівнянь Колмогорова:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1,\, j\neq i}^{5} p_j(t)\lambda_{ij} - p_i(t) \sum_{j=1,\, j\neq i}^{5} \lambda_{ij}, \; i = 1,...,5. \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= -\lambda_{12} p_1(t) + \lambda_{21} p_2(t), \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{12} p_1(t) + \lambda_{52} p_5(t) - (\lambda_{21}+\lambda_{23}+\lambda_{24}) p_2(t), \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{23} p_2(t) - \lambda_{35} p_3(t), \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= \lambda_{24} p_2(t) - \lambda_{45} p_4(t), \\ \frac{dp_5(t)}{dt} &= \lambda_{35} p_3(t) + \lambda_{45} p_4(t) - \lambda_{52} p_5(t). \end{aligned} \quad (4.31)$$

Розв’язання системи дає змогу визначити прогнозні ймовірності перебування оператора в окремих фазах операторського циклу, оцінити очікувані часові інтервали виконання дій та виявити стани, у яких можливе зростання затримки, перевантаження або порушення штатної послідовності прийняття рішень.

Адекватність марківської моделі перевіряється шляхом порівняння прогнозованих і фактичних часових інтервалів перебування у станах, аналізу похибки прогнозу, перевірки довірчих інтервалів для λ_{ij} та зіставлення емпіричної матриці переходів із модельною.

Для кожного переходу може бути задана стандартна похибка оцінки інтенсивності:

$$SE\left(\lambda_{ij}\right)=\frac{\sqrt{N_{ij}}}{T_i},\ i\neq j\,. \tag{4.32}$$

Тоді наближений довірчий інтервал для λ_{ij} має вигляд:

$$\lambda_{ij}\pm z_{\alpha/2}SE\left(\lambda_{ij}\right), \tag{4.33}$$

де $z_{\alpha/2}$ – квантиль нормального розподілу для вибраного рівня значущості.

Для реалізації запропонованого підходу розроблено програмний засіб, який автоматизує обчислення прогнозних діапазонів і дає змогу в режимі, наближеному до реального часу, оцінювати часову структуру наступного циклу діяльності оператора (рис. 4.5).

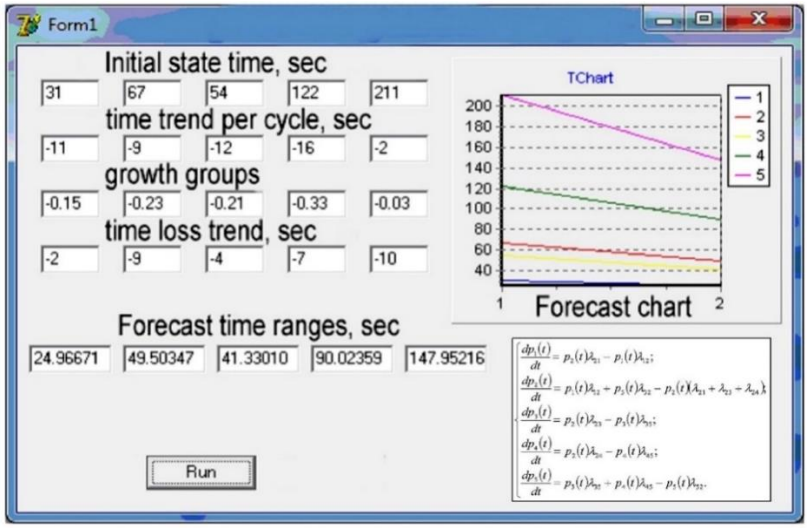


Рисунок 4.5. Інтерфейс системи прогнозування

Отже, у підрозділі розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги оператора, яка дає змогу подати обмежений ресурс уваги як нормований векторний розподіл між функціонально значущими каналами інформаційного поля оператора.

На цій основі введено формальний опис механізмів перерозподілу уваги та обґрунтовано умови виникнення неповного охоплення навігаційної ситуації як передумови помилки в ергатичному контурі керування. Додатково запропоновано темпоральну модель часових станів операторського циклу на основі марковського підходу, що забезпечує основу для прогнозування дій оператора під час несення навігаційної вахти. Отримані результати формують теоретичне підґрунтя для подальших підрозділів розділу 4, у яких буде розвинуто моделі дисторсії часу, психофізіологічної напруженості, втоми та інших когнітивно-поведінкових станів оператора.

4.2. Моделі, методи та засоби ідентифікації дисторсії суб’єктивного часу оператора в процесах управління рухом судна

Аналіз відхилень у траєкторії руху судна, часових параметрів маневрування та послідовностей дій оператора свідчить про істотний вплив людського фактора на формування керувальних рішень у складних навігаційних ситуаціях. Одним із найменш формалізованих, але водночас критично важливих проявів цього впливу є індивідуальне сприйняття часу оператором, яке в умовах підвищеного навантаження, дефіциту часу, інформаційної перенасиченості або психоемоційної напруги може набувати викривленої форми [77, 340].

У межах ергатичної системи навігаційного забезпечення така викривлена форма часової оцінки має розглядатися як окремий функціональний прояв когнітивно-психофізіологічного стану оператора. На відміну від зовнішньо спостережуваних параметрів траєкторії, швидкості або кута перекладки керма, дисторсія суб’єктивного часу не вимірюється безпосередньо, а виявляється опосередковано – через затримки реакцій, перебудову часових рамок виконання дій, зміну структури послідовності

операцій і відхилення від типового профілю маневрування. Саме тому задача ідентифікації дисторсії суб'єктивного часу оператора потребує поєднання математичних, логіко-структурних та інформаційно-аналітичних засобів [74].

Сучасні автоматизовані та інтелектуальні навігаційні системи ефективно обробляють формалізовані параметри руху судна, однак мають обмежені можливості щодо урахування внутрішніх часових деформацій оператора, що виникають у процесі оцінювання ситуації та прийняття рішень. Унаслідок цього виникає суперечність між необхідністю точного врахування людського фактора в контурах управління рухом судна і відсутністю достатньо повних інформаційних моделей, здатних відображати індивідуальне сприйняття часу оператором [211].

З огляду на це, актуальність цього дослідження полягає у розробленні моделей, методів і засобів ідентифікації дисторсії суб'єктивного часу оператора на основі експериментальних навігаційних даних, одержаних у процесі виконання типових і критичних маневрів. Такий підхід має не лише теоретичне значення для розвитку моделей людського фактора в навігаційних системах, а й безпосередню прикладну цінність для підвищення безпеки морського транспорту, оскільки дає змогу виявляти ранні ознаки часової дезорганізації діяльності оператора [78].

У цьому контексті фактор часу доцільно інтерпретувати ДЧС як розбіжність між об'єктивною тривалістю або часовою міткою події та її суб'єктивною оцінкою оператором. Відповідно дисторсія часу розглядається як міра розбіжності між об'єктивною і суб'єктивною часовою оцінкою, що виникає під час виконання маневру або аналізу навігаційної обстановки. Саме така постановка дає змогу перейти від загального опису психологічного явища до його формалізованого подання в межах задачі управління рухом судна.

Моделювання і прогнозування поведінки оператора з урахуванням індивідуального сприйняття часу є особливо важливими для систем забезпечення безпеки плавання, підтримки прийняття рішень і ризик-орієнтованого аналізу навігаційної ситуації. У випадках високої невизначеності, стресу або швидкої зміни обстановки саме часове спотворення

може призводити до несвоєчасної реакції, неправильної пріоритезації інформації, затримки переходу до наступної дії або, навпаки, до передчасного виконання маневру без повного аналізу ситуації [75, 90].

У зв’язку з цим у підрозділі поставлено такі завдання:

1. розробити узагальнену модель формування дисторсії суб’єктивного часу з метою визначення рівня її індивідуального прояву;

2. побудувати математичні моделі та автоматизовані засоби для ідентифікації інтервалів дисторсії суб’єктивного часу на фактичній траєкторії руху судна;

3. розробити формальну систему формування індивідуальних часових кодів та визначити умови їх активації у критичних ситуаціях;

4. сформувати процедуру прикладної апробації запропонованих підходів на тренажерних і навігаційних даних із подальшою експериментальною верифікацією у розділі 6.

Загальна технологія ідентифікації ДЧС. Для уникнення фрагментарності подальшого викладу ідентифікація дисторсії суб’єктивного часу в цьому підрозділі розглядається як послідовний інформаційно-аналітичний контур. Його структура має такий вигляд:

Спостережувані дані → ознаки → базова модель ДЧС → допоміжні індикатори → правило прийняття рішення.

На *першому рівні* використовуються спостережувані дані навігаційного тренажера або бортових інформаційних систем: часові мітки дій, параметри руху судна, траєкторні відхилення, зміни курсу, швидкості, режимів керування, а також ознаки взаємодії оператора з ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, GPS, рульовим керуванням і машинним телеграфом.

На *другому рівні* з цих даних формуються ознаки, що можуть свідчити про появу ДЧС: збільшення або скорочення часу виконання операцій, порушення типової послідовності дій, нетипові зміни параметрів руху, зростання кількості повторних звернень до одного й того самого джерела інформації, затримка переходу до керувальної дії або передчасне виконання маневру.

На *третьому рівні* формується інтегральний індикатор прояву ДЧС, який визначає ймовірність або інтенсивність появи часової дисторсії на певному фрагменті траєкторії. Допоміжні математичні методи – нечіткі множини, ентропійні показники, графове подання та енергетична інтерпретація – використовуються не як незалежні моделі, а як засоби деталізації окремих компонентів базової процедури (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Роль математичних апаратів у процедурі ідентифікації ДЧС

Математичний апарат	Роль	Вхідні дані	Вихідний результат	Статус
Марківська модель	опис імовірнісних переходів між станами або діями	послідовність дій, часові мітки	імовірності переходів, очікування ДЧС	базова модель
Нечіткі множини	опис слабко формалізованих меж між нормою і дисторсією	нормовані ознаки відхилень	ступінь належності до стану ДЧС	допоміжний індикатор
Просторова модель ДЧС	візуалізація впливу груп чинників	фактори середовища, вахти, комунікації	рівень факторного навантаження	пояснювальна модель
Граф дій	подання послідовності операцій	вузли дій, переходи між ними	структура траєкторії поведінки	структурна модель
Суб'єктивна ентропія	оцінка невпорядкованості вибору	альтернативи, ймовірності вибору	рівень невизначеності дій	індикатор ризику
Енергетична концепція	інтерпретація ресурсу виконання дії	складність дії, інформаційне навантаження	дефіцит ресурсу / критичний імпульс	допоміжна інтерпретація
Антиципація	опис випереджального очікування дій	попередній досвід, асоціації, ситуація	прогнозована перебудова дії	пояснювальний блок

Нехай для фрагмента траєкторії e сформовано множину нормованих ознак:

$$X_e = \left\{ C_e^T, C_e^R, C_e^Y, C_e^S, C_e^A \right\},$$

де C_e^T – нормоване часове відхилення;

C_e^R – нормована ознака зміни кутової швидкості або курсової динаміки;

C_e^Y – нормована ознака зміни курсу або рискання;

C_e^S – нормована ознака зміни швидкісного або просторового профілю;

C_e^A – нормована ознака порушення типової послідовності дій або антиципаційної перебудови.

Тоді інтегральний індикатор прояву ДЧС для фрагмента *e* можна подати як: $I_D(e) = \omega_T C_e^T + \omega_R C_e^R + \omega_Y C_e^Y + \omega_S C_e^S + \omega_A C_e^A$,

за умови: $\omega_T + \omega_R + \omega_Y + \omega_S + \omega_A = 1,\ \omega_l \geq 0$.

Рішення щодо наявності ДЧС приймається за пороговим правилом:

$$D(e) = \begin{cases} 0,\ I_D(e) < \theta_1, \\ 1,\ \theta_1 \leq I_D(e) < \theta_2, \\ 2,\ I_D(e) \geq \theta_2, \end{cases} \tag{4.34}$$

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < 1, \tag{4.35}$$

де $D(e) = 0$ відповідає відсутності ознак ДЧС;

$D(e) = 1$ – помірний прояв ДЧС;

$D(e) = 2$ – виражений прояв ознак ДЧС.

Для подальшого використання цієї моделі введемо позначення, які дозволяють пов’язати траєкторію дій оператора з імовірністю появи дисторсії суб’єктивного часу. Нехай a_i та a_j – два послідовні стани або вузли траєкторії дій оператора; p_{ij} – імовірність переходу зі стану a_i до стану a_j; q_{ij}^D – умовна ймовірність появи ДЧС під час такого переходу; c_{ij}^D – коефіцієнт інтенсивності або вагомості прояву ДЧС для відповідного переходу.

Тоді математичне очікування появи ДЧС на траєкторії може бути подане у вигляді:

$$M_D = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \pi_i p_{ij} q_{ij}^D c_{ij}^D, \tag{4.36}$$

$$\pi_i \geq 0,\ \sum_{i=1}^{n} \pi_i = 1,$$

$$p_{ij} = P\left(A_{t+1} = \alpha_j \mid A_t = a_i\right),$$

$$p_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1,$$

$$q_{ij} = P\left(D = 1 \mid A_t = a_i, A_{t+1} = a_j\right), \quad q_{ij}^D \in [0;1],\ c_{ij}^D \in [0;1]. \tag{4.37}$$

де π_i – імовірність перебування оператора у вузлі або стані a_i;

p_{ij} – імовірність переходу зі стану a_i до стану a_j;

q_{ij}^D – умовна імовірність появи ДЧС під час переходу $a_i \rightarrow a_j$;

c_{ij}^D – ваговий коефіцієнт, що враховує тривалість, інтенсивність або критичність прояву ДЧС.

Однак така форма опису є недостатньою для повного відображення феномена ДЧС, оскільки поява часової дисторсії не зводиться лише до випадкового переходу між станами. Її прояв залежить від сукупності одночасно сприйманих інформаційних чинників, характеру навігаційної обстановки, рівня складності маневру, індивідуального досвіду оператора та поточного функціонального стану. Саме тому дисторсія суб'єктивного часу має розглядатися як складне багатофакторне явище, що поєднує елементи стохастичності, нечіткої невизначеності та індивідуальної когнітивної варіативності [76].

У зв'язку з цим процеси прийняття рішень оператором доцільно також описувати засобами теорії нечітких множин, які дозволяють формалізувати слабко структуровані взаємозв'язки між параметрами, що не мають жорстко визначених меж.

$$\tilde{D} = \left\{\left(x, \mu_{\tilde{D}}(x)\right) \mid x \in U_D\right\}, \tag{4.38}$$

$$U_D = [0;1],\ \mu_{\tilde{D}} : U_D \rightarrow [0;1], \tag{4.39}$$

$$\Pi_{\tilde{D}}(B) = \sup_{x \in B} \mu_{\tilde{D}}(x),\ B \subseteq U_D \tag{4.40}$$

де U_D – носій нечіткої змінної ДЧС, $\mu_{\tilde{D}}(x)$ – функція належності, $\Pi_{\tilde{D}}(x)$ – міра можливості події *B*.

Ступінь належності фрагмента *e* до стану ДЧС задається як:

$$\mu_{\tilde{D}}(x)=\begin{cases}0, & x<\theta_1,\\ \dfrac{x-\theta_1}{\theta_2-\theta_1}, & \theta_1\le x<\theta_2,\\ 1, & x\ge\theta_2.\end{cases} \tag{4.41}$$

Наведені співвідношення демонструють, що формальний опис часової дисторсії може бути поданий у вигляді узагальненого розподілу, однак його практичне використання в задачі судноводіння ускладнюється тим, що фактор ДЧС лише частково підпорядковується типовому характеру змін і формується під впливом неоднорідного спектра параметрів. Інакше кажучи, для ідентифікації ДЧС недостатньо лише статистичної апроксимації; необхідне просторове, ситуаційне та поведінкове подання цього явища.

Саме з цією метою були використані експериментальні дані навігаційних приладів і сенсорів, одержані під час маневрування в протоці Босфор із застосуванням сертифікованого навігаційного тренажера Navi-Trainer Professional 5000 [205]. Особливість обраної локації полягає у високій насиченості навігаційної обстановки, складному маневруванні, наявності значної кількості рухомих цілей (суден-цілей) і наближеності умов до реального морського середовища. Для забезпечення коректності порівняння були враховані близькі природні умови, час доби, сезонні фактори та просторове розташування порту (рис. 4.6).

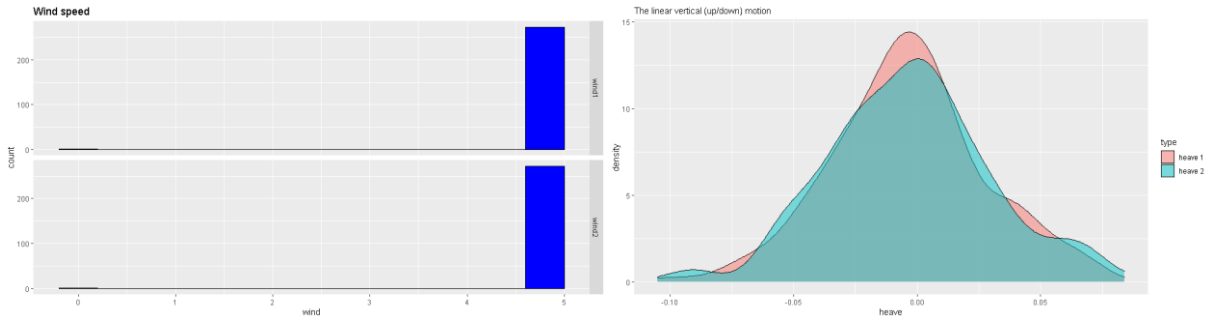


Рисунок 4.6. Відношення природних факторів вітру «wind 1, 2» та вертикального переміщення судна «heave 1, 2»

Попри близькість початкових умов і високий рівень підготовки операторів, було встановлено, що графіки поздовжнього переміщення судна істотно відрізняються. Крім того, в окремих епізодах оператор обирав маневр,

який не був типовим для цієї локації. Це свідчить про наявність індивідуальних механізмів реагування, які не можуть бути пояснені лише зовнішніми умовами середовища чи формальними параметрами задачі (рис. 4.7).

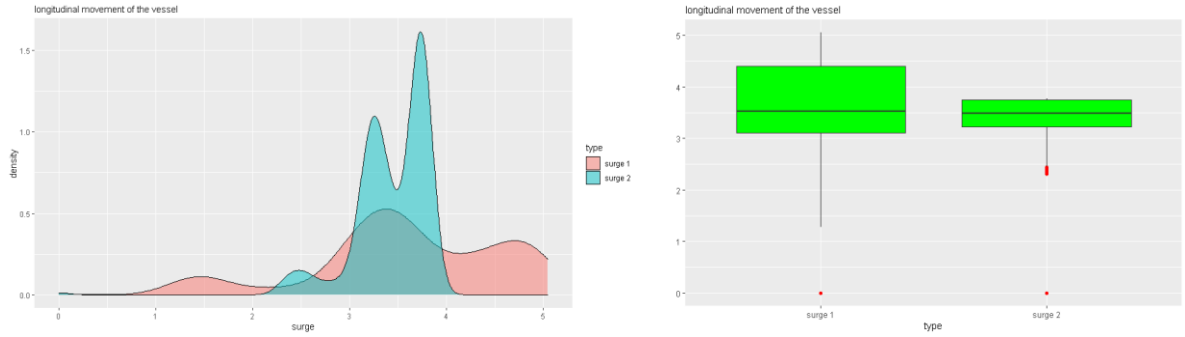


Рисунок 4.7. Графіки щільності розподілу та медіани поздовжнього переміщення судна «surge». Surge 1 при використанні автопілота і Surge 2 при ручному керуванні капітаном

У таких ситуаціях аварійного розвитку ситуації було уникнено, однак оператор суб'єктивно не сприймав свої дії як помилкові. Це формує принципове протиріччя між об'єктивним часово-поведінковим відхиленням і суб'єктивною оцінкою правильності власних дій. Саме така розбіжність є характерною ознакою ДЧС і вказує на необхідність побудови моделей, здатних виявляти приховану перебудову стратегії дій у критичних і квазікритичних навігаційних ситуаціях.

Для наочного визначення індивідуального рівня дисторсії суб'єктивного часу пропонується узагальнена просторова модель, побудована на основі тривимірної декартової системи координат, кожна вісь якої відповідає окремій групі чинників(рис. 4.8).

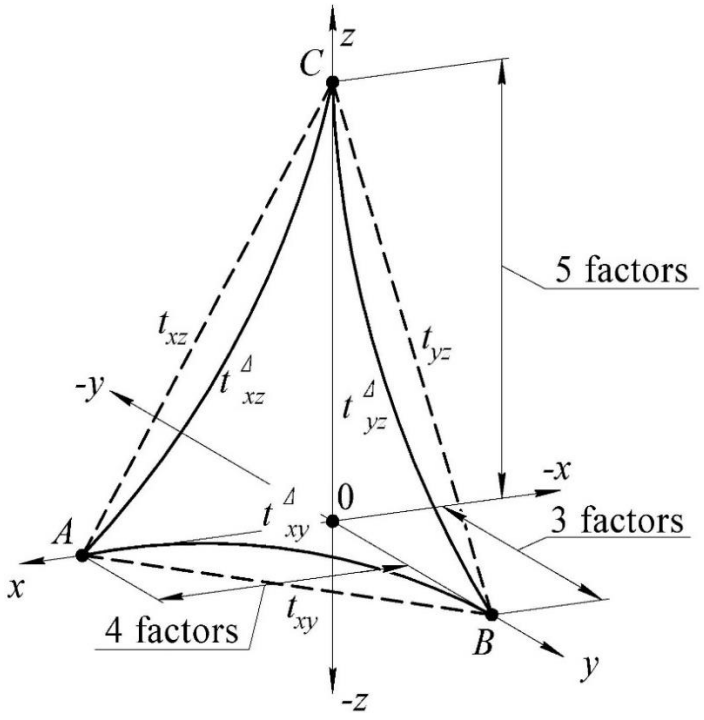


Рисунок 4.8. Модель формування ДЧС в тривимірному просторі

Узагальнена модель формування ДЧС у тривимірному просторі задається координатами:

x, *–x* (Навколишнє середовище);

y, *–y* (Навігаційні системи і сенсори);

z, *–z* (Голосові команди).

На кожній осі відображаються точки *A*, *B*, *C* , розташовані на умовній відстані, що відповідає кількості інформаційних чинників, які одночасно охоплює оператор. У цій інтерпретації рівень дисторсії часу зростає зі збільшенням критичної суми параметрів, які одночасно впливають на контур сприйняття й прийняття рішень. Залежно від рівня професійного досвіду оператора вводиться порогове значення допустимого факторного навантаження m_{crit}, за якого ознаки ДЧС ще не вважаються проявленими. У цій роботі значення m_{crit} використовуються як первинні експертно-калібровані пороги, що відображають припущення про вищу здатність досвідченого оператора одночасно обробляти більшу кількість інформаційних чинників без порушення часової організації дій.

Порогова шкала має вигляд:

$$m_{crit}(r)=\begin{cases}7, & r=1,\\ 8, & r=2,\\ 9, & r=3,\end{cases} \tag{4.42}$$

де $r = 1$ – відповідає недосвідченому оператору;

$r = 2$ – оператору середнього рівня підготовленості;

$r = 3$ – досвідченому оператору.

Факт перевищення допустимого факторного навантаження визначається умовою: $m(t) > m_{crit}(r)$, де $m(t)$ – кількість одночасно активних інформаційних чинників у момент часу t.

Для кількісного подання ступеня перевищення порога може бути використаний нормований показник:

$$C_m(t)=clip\left(\frac{m(t)-m_{crit}(r)}{m_{\max}-m_{crit}(r)},0,1\right), \tag{4.43}$$

де $m_{\max}$ – максимально можлива кількість чинників, що враховуються у відповідній експериментальній постановці; $clip(\cdot)$ – оператор обмеження значення в інтервалі [0;1].

Таким чином, значення 7, 8 і 9 не трактуються як універсальні психофізіологічні константи. Вони виконують роль первинних порогів моделі, які можуть бути уточнені за результатами статистичного аналізу тренажерних спостережень, експертного оцінювання або валідації за допомогою незалежних психофізіологічних показників.

$$\hat{D}_m(t)=\begin{cases}1, & m(t)>m,\\ 0, & m(t)\le m.\end{cases}$$

$$Se_r(m)=P\left(\hat{D}_m=1\,|\,D^*=1,r\right),$$

$$Sp_r(m)=P\left(\hat{D}_m=0\,|\,D^*=1,r\right),$$

$$m^*_{crit}(r)=\arg\max_m\left[Se_r(m)+Sp_r(m)-1\right], \tag{4.44}$$

де D^* – зовнішньо підтверджений прояв ДЧС; $Se_r(m)$ і $Sp_r(m)$ – чутливість і специфічність порога для групи досвіду r.

Запропонована геометрична інтерпретація дає змогу перейти до більш детального опису простору формування ДЧС та, відповідно, до побудови формальної системи дій оператора. Оскільки в кожен конкретний момент несення навігаційної вахти фактично реалізується лише один набір твірних та координатних напрямів, усі можливі дії оператора можуть бути віднесені до одного з восьми октантів декартового простору.

Для базової ідентифікації ДЧС достатнім є подання траєкторії дій оператора у вигляді орієнтованого графа переходів, у якому вузли відповідають елементарним діям або фазам операторського циклу, а ребра – переходам між ними. Таке подання є основним для розрахунку часових інтервалів, частот переходів, затримок і порушень типової послідовності дій.

Базовий граф дій задається як:

$$G_{op} = \left(K_{op}, E \right),$$

де $K_{op} = \{k_1, k_2, \ldots, k_m\}$ – множина операцій або вузлів траєкторії дій; $E \subseteq K_{op} \times K_{op}$ – множина допустимих переходів між ними.

Для послідовності дій оператора:

$$\Gamma = \left(k_1, k_2, ..., k_s \right), \tag{4.45}$$

множина фактичних переходів визначається як:

$$E_\Gamma = \left\{ \left(k_l, k_{l+1} \right) | \, l = 1, ..., s-1 \right\}. \tag{4.46}$$

Граф Келі доцільно використовувати не як універсальну заміну такого графа переходів, а як спеціалізоване алгебраїчне подання для випадків, коли поведінкова траєкторія має повторювані, обернені або циклічні фрагменти, а також коли потрібно формально описати повернення до попередньої стратегії або зміну напряму дії.

Для опису повторюваних, обернених або циклічних зміщень вводиться група: $G_{grp} = \left\langle x, y, z \,|\, x^2 = y^2 = z^2 = e \right\rangle$.

Породжувальна множина: $S = \{x, y, z\}$.

Граф Келі задається як: $G_{Cay} = Cay\left(G_{grp}, S \right)$.

Його вершини: $V\left(G_{Cay} \right) = G_{grp}$.

Його ребра: $E\left(G_{Cay}\right)=\left\{\left(g,g\cdot s\right)|\, g\in G,s\in S\right\}$.

Уточнення ймовірностей та переходів моделі.

$$P=\left\{p_{ij}\right\},$$
$$p_{ij}=P\left(a_j\,|\,a_i\right),$$
$$p_{ij}\geq 0,\ \sum_{j=1}^{n}p_{ij}=1. \tag{4.47}$$

Ймовірність прояву ДЧС на переході: $q_{ij}^{D}=P\left(D=1|\,a_i\to a_j\right)$.

Ваговий коефіцієнт прояву ДЧС: $c_{ij}^{D}\in\left[0;1\right]$.

Математичне очікування прояву ДЧС: $M_D=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j}^{n}\pi_i p_{ij}q_{ij}^{D}c_{ij}^{D}$.

Умови нормування: $\pi_i\geq 0,\ \sum_{i=1}^{n}\pi_i=1$.

Тут G_{op} описує фактичну послідовність дій, а G_{Cay} використовується лише для структурного аналізу повторів, повернень і циклічних фрагментів траєкторії поведінки (рис. 4.9).

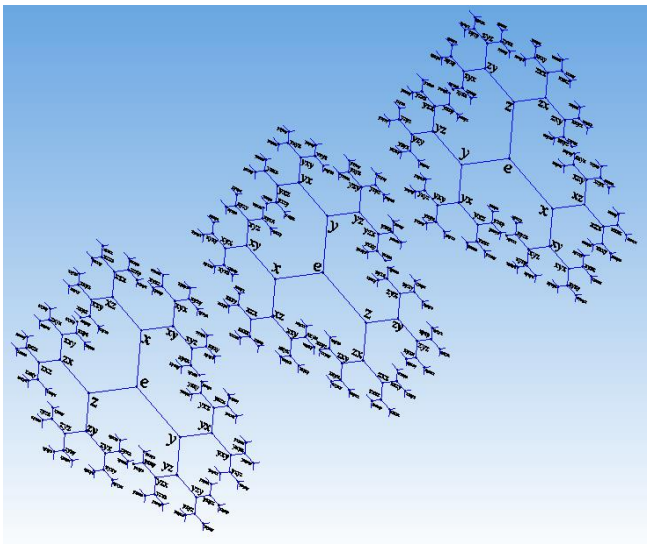


Рисунок 4.9. Формування графа Келі дій оператора

Оскільки побудований граф задано в системі генераторів *x, y, z*, він може піддаватися афінним перетворенням на площині, зокрема відносно центру *e*. Звідси випливає можливість обертання або зсуву, графа на кут, кратний 120º,

унаслідок чого формуються три різновиди графа G_1, G_2 і G_3 пов'язані між собою співвідношеннями: $G_2 = f(G_1)$, $G_3 = g(G_2) = g(f(G_1))$. Це означає, що відповідні графові конфігурації є конгруентними та можуть використовуватися для подання різних варіантів проходження траєкторії дій оператором $G_1 \cong G_2 \Rightarrow G_2 \cong G_3$. Отже оператору слід виконувати дії відповідно до заздалегідь сформованої траєкторії дій. Первинне планування здійснюється на основі набутого досвіду, унаслідок чого формуються індивідуальні часові рамки виконання операцій. Експериментальні дані, накопичені протягом двох років під час виконання навігаційних завдань і маневрів із використанням ECDIS, ARPA та інших технічних засобів, дали змогу сформувати базу даних навігаційних подій із точністю 1–4 с для відстеження часових параметрів дій оператора (рис. 4.10).

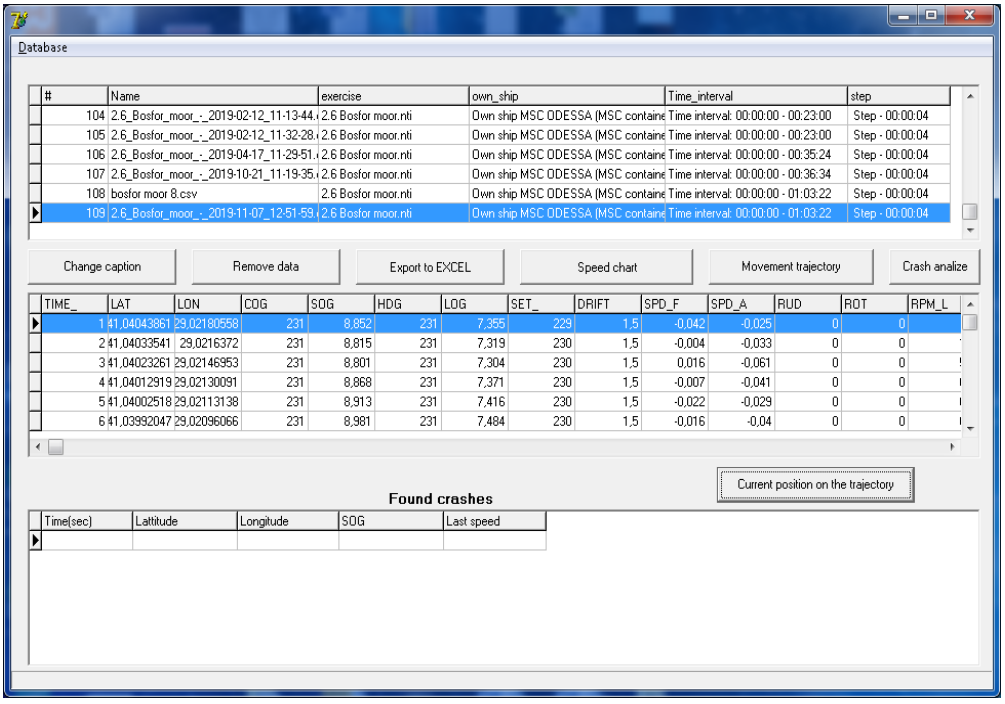


Рисунок 4.10. База даних навігаційних подій

Аналіз бази даних дозволив виділити типові часові інтервали для широкого класу дій, що здійснюються під час несення навігаційної вахти. На цій основі було сформовано класифікаційну схему, яка дає змогу виявляти недопустиме збільшення або зменшення часових рамок виконання операцій. Збільшення часових рамок інтерпретується як ознака перебудови стратегії дій, тоді як їх

зменшення може свідчити про зростання функціональної ентропії, втрату повноти контролю над ситуацією та потенційне погіршення якості навігаційного рішення.

У результаті з'являється можливість побудови математичних моделей і програмно-апаратних засобів для ідентифікації інтервалів ДЧС безпосередньо на фактичній траєкторії руху судна. При цьому кожний вузол траєкторії інтерпретується як локальна подія, що передбачає обробку скінченної кількості сигналів від приладів і об'єктів сприйняття, зокрема RADAR, ARPA, AIS, ECDIS, GPS та інших елементів інформаційного поля оператора.

Перевищення гранично допустимої кількості об'єктів одночасного сприйняття на ходовому містку, як показано в попередньому підрозділі, призводить до дисбалансу уваги, втрати впевненості у правильності оцінювання ситуації та, як наслідок, до порушення нормативного часу виконання навігаційного завдання. Саме тому припускається, що в кожному вузлі траєкторії існує можливість появи ознак ДЧС, а сама траєкторія може бути подана як рухома конструкція на площині (рис. 4.11).

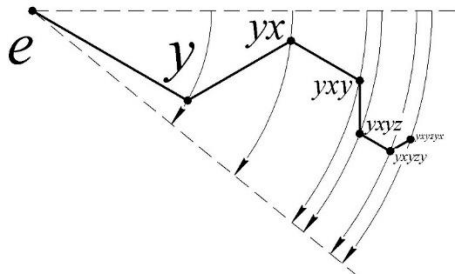


Рисунок 4.11. Процес зміщення вузлових точок

У такій постановці початкова схема графа відповідає конфігурації *xyz*, зміщення під кутом $\frac{2\pi}{3}$ формує схему *zxy*, а зміщення під кутом $\frac{4\pi}{3}$ – схему *yzx*. Нульове зміщення або зміщення на 2π позначається як a_0, відповідно зміщення на $\frac{2\pi}{3}$ – як a_1, а на $\frac{4\pi}{3}$ – як a_2. Алгебраїчні співвідношення між цими елементами мають вигляд:

$$\mathcal{A} = \{a_0, a_1, a_2\},\ a_k : \Gamma \to R_{\frac{2\pi k}{3}}\Gamma,\ k = 0,1,2. \qquad (4.48)$$

$$a_i \circ a_j = a_{(i+j) \bmod 3}.$$

Отже, $\mathcal{A}$ утворює циклічну групу порядку 3 відносно операції композиції зміщень.

Такий опис дає змогу формалізувати характерні варіанти переходу від проєктованої траєкторії дій до фактичної. Якщо, наприклад, відбувається зміщення за траєкторією відносно базової схеми, то у відповідній вузловій точці оператор витрачає додатковий час на візуальний аналіз навколишньої обстановки, внаслідок чого виходить за межі нормативних часових рамок. Саме в цьому випадку ідентифікація ДЧС стає очевидною через зміну структури проходження траєкторії.

Запропонована модель ідентифікації ДЧС дає змогу обробляти довільну траєкторію поведінки оператора в межах вибраної системи генеруючих груп та створює основу для автоматизованого виявлення індивідуальних часових відхилень на базі експериментальних даних.

Нехай початкова траєкторія дій має вигляд:

$$\Gamma = (y, x, y, z, y, x). \tag{4.49}$$

Локальне зміщення виконується у п’ятій вузловій позиції: $k = 5$.

Для цієї позиції задається перетворення: $a_1(y) = z$.

Тоді локальне перетворення траєкторії має вигляд:

$$T_{5,a_1}(\Gamma) = (y, x, y, z, a_1(y), x). \tag{4.50}$$

Звідси:

$$T_{5,a_1}(yxyzyx) = yxyzzx. \tag{4.51}$$

Отже, у цьому прикладі змінюється лише п’ята вузлова позиція, тому результатом є траєкторія *yxyzzx*, а не повна заміна всіх символів траєкторії.

Запропонована модель ідентифікації ДЧС дає змогу обробити будь-яку траєкторію поведінки оператора в межах вибраної системи породжувальних елементів групи *G*. Також з'являється можливість автоматизованої ідентифікації ДЧС за умови сформованої упродовж понад трьох років експериментальної бази даних виконання завдань операторами. У результаті проведеного аналізу виявлено індивідуальні особливості зміщення графа операторів. Це дозволило визначити ймовірнісні моделі переходу з вузла траєкторії a_i до вузла a_j в

типових ситуаціях.

Сформовані досвідчені зв'язки оператора дозволяють виділити ймовірність такого переходу π_{ij}^{l}. Важливим елементом є закріплення вхідних параметрів ситуації x_l, за яких спостерігалася висока емпірична ймовірність позитивного результату. Таким чином, для оператора в кожній вузловій точці з вхідною ймовірністю $\left(\pi_{ij}^{l}; 1-\pi_{ij}^{l}\right)$ завжди є вибір: не змінювати заплановану траєкторію або здійснити зміщення в рамках елемента a_2 з відповідними ймовірностями $Q_1(t)$ і $Q_2(t)$ на момент часу *t*.

Для зменшення неоднозначності подальшого викладу матрицю переходів доцільно трактувати як індивідуальну емпіричну модель поведінкових переходів оператора. Її елементи не є універсальними константами, а уточнюються за результатами повторних проходжень локації, виконання однотипних маневрів або накопичення тренажерних спостережень.

Нехай a_i та a_j – два вузли траєкторії дій оператора, а $\pi_{ij}^{(l)}$ – імовірність переходу з вузла a_i до вузла a_j за умов ситуації $x^{(l)}$. Якщо результат переходу є позитивним, тобто дія не призводить до порушення часової організації, то відповідна ймовірність зростає. Якщо результат є негативним і супроводжується виходом за нормативний часовий інтервал, то ймовірність переходу коригується як потенційно ризикова.

Позитивні наслідки формують рядок матриці перехідних імовірностей, а негативні наслідки – окремий рядок ризикових переходів. Для кожного класу ситуації *l* формується матриця емпіричних переходів:

$$P^{(l)}(t) = \left[p_{ij}^{(l)}(t) \right]_{n \times n}. \tag{4.52}$$

Елементи матриці визначаються за нормованими частотами переходів:

$$p_{ij}^{(l)}(t) = \frac{N_{ij}^{(l)}(t) + \alpha}{\sum_{i=1}^{n} \left(N_{ij}^{(l)}(t) + \alpha \right)} = \frac{N_{ij}^{(l)}(t) + \alpha}{\sum_{i=1}^{n} N_{ij}^{(l)}(t) + n\alpha}, \ \alpha > 0. \tag{4.53}$$

Умови коректності матриці переходів:

$$p_{ij}^{(l)}(t) \geq 0,\ \sum_{j=1}^{n} p_{ij}^{(l)}(t) = 1. \tag{4.54}$$

Тут нормування виконується в межах одного рядка матриці, тобто для всіх можливих переходів із поточного вузла a_i до вузлів a_j. Параметр α використовується як згладжування, що запобігає появі нульових імовірностей за обмеженої кількості спостережень.

Для розділення позитивних і ризикових наслідків переходу додатково вводиться ризик-коефіцієнт:

$$r_{ij}^{(l)}(t) = \frac{N_{ij}^{(l,-)}(t) + \beta}{N_{ij}^{(l,+)}(t) + N_{ij}^{(l,-)}(t) + 2\beta},\ \beta > 0. \tag{4.55}$$

Тут $N_{ij}^{(l)}(t)$ – кількість переходів $a_i \rightarrow a_j$ у ситуації класу l; $N_{ij}^{(l,+)}(t)$ – кількість переходів без порушення часової організації; $N_{ij}^{(l,-)}(t)$ – кількість переходів із виходом за нормативний часовий інтервал.

Із кожним повторним проходженням локації, а також у процесі виконання однорідних завдань і маневрів, матриця перехідних імовірностей оператора уточнюється. Це означає, що індивідуальна модель часово-поведінкових дій не є статичною, а формується внаслідок накопичення досвіду, закріплення звичних схем реагування та перебудови механізмів антиципації. Саме тому на динаміку дій істотно впливають не лише зовнішні навігаційні умови, а й внутрішній психофізіологічний стан оператора, який може бути опосередковано оцінений за показником суб’єктивної ентропії.

Суб’єктивна ентропія в межах цієї задачі трактується як узагальнена характеристика внутрішньої невпорядкованості процесу вибору дій, що відображає ступінь невизначеності, нестійкості або перебудови індивідуального механізму прийняття рішень. Її прояв опосередковано виявляється через аналіз часових рядів швидкості та курсу судна, які відбивають рівень упевненості оператора у виконуваних діях, послідовність мікрооперацій і наявність або відсутність часових розривів у реалізації маневрового плану.

У цьому контексті інтервали ДЧС доцільно інтерпретувати як ділянки фізичної траєкторії, в межах яких відбувається порушення нормативної часової

організації операторського циклу, що супроводжується локальним зростанням ентропії вибору, зниженням стабільності керувальних впливів і появою нехарактерних коливань параметрів руху судна (рис. 4.12).

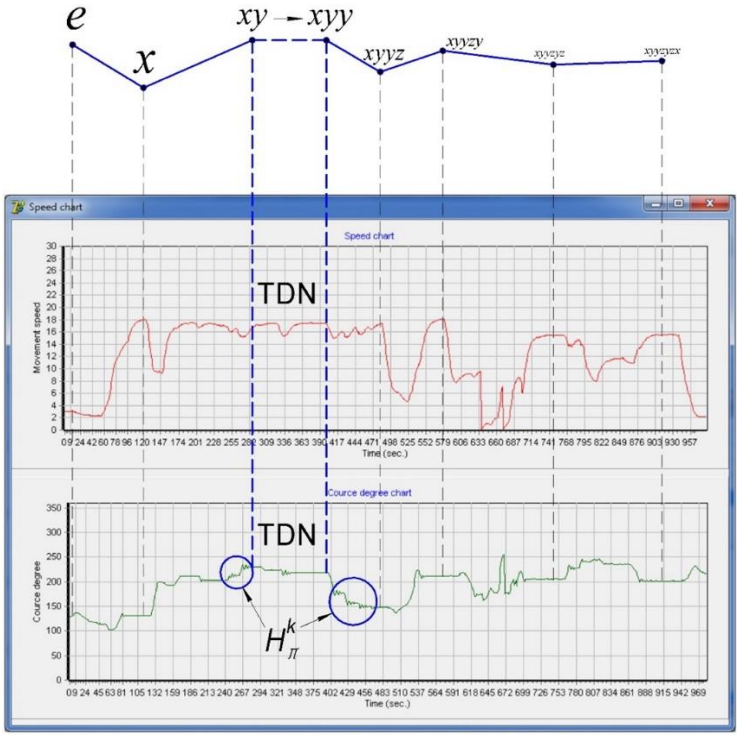


Рисунок 4.12. Модель ідентифікації інтервалів ДЧС (TDN) на фактичній траєкторії руху судна

Для кількісної оцінки невизначеності вибору дій оператора використовують ентропію Шеннона. У межах цієї задачі вона не характеризує фізичну термодинамічну ентропію, а відображає ступінь невпорядкованості або невизначеності під час вибору між можливими діями, стратегіями або класами поведінкових реакцій.

Нехай у певному фрагменті навігаційної ситуації оператор може перейти до одного з k можливих класів дій: $A=\{A_1, A_2, ..., A_k\}$, де A_s – s-й клас дії або поведінкової реакції.

Імовірність вибору класу A_s позначимо як: $p_s = \Pr\{A = A_s\}$, $s = 1,...,k$.

Для всіх імовірностей виконується умова нормування: $p_s \geq 0$, $\sum_{s=1}^{k} p_s = 1$.

Тоді ентропія вибору дій оператора визначається класичним співвідношенням Шеннона: $H(A) = -\sum_{s=1}^{k} p_s \ln p_s$.

Якщо вибір оператора майже однозначний, тобто одна альтернатива має ймовірність, близьку до одиниці, а інші – близькі до нуля, то ентропія наближається до мінімального значення: $H(A) \to 0$.

Це відповідає стійкій, упорядкованій і усталеній професійній моделі дій. Максимальне значення ентропії досягається тоді, коли всі альтернативи є рівноймовірними: $p_1 = p_2 = ... = p_k = \frac{1}{k}$.

У цьому випадку:

$$H_{\max}(A) = -\sum_{s=1}^{k} \frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{k}\right) = \ln k. \quad (4.56)$$

Для порівняння ситуацій із різною кількістю альтернатив доцільно використовувати нормовану ентропію:

$$H_N(A) = \frac{H(A)}{\ln k},\ 0 \le H_N(A) \le 1. \quad (4.57)$$

У прикладному сенсі низьке значення $H_N(A)$ означає, що оператор діє за стійким і передбачуваним сценарієм. Високе значення $H_N(A)$ свідчить про невизначеність у виборі, нестійкість поведінкової стратегії або перебудову дій у ситуації дефіциту часу, інформаційного перевантаження чи зростання навігаційного ризику. Саме тому підвищення нормованої ентропії може розглядатися як допоміжний індикатор імовірного прояву ДЧС.

У задачі ідентифікації ДЧС імовірності p_s можуть оцінюватися кількома способами залежно від доступних даних. Якщо є статистика повторних проходжень або тренажерних експериментів, то p_s визначається як відносна частота вибору відповідного класу дії:

$$p_s = \frac{N_s}{N}, \quad (4.58)$$

де N_s – кількість випадків вибору класу дії A_s; N – загальна кількість зафіксованих дій або переходів у відповідному фрагменті спостережень.

Якщо кількість спостережень є обмеженою, то p_s може оцінюватися за експертно-каліброваною або байєсівською схемою:

$$p_s = \frac{N_s + \alpha_s}{N + \sum_{r=1}^{k} \alpha_r} \tag{4.59}$$

де α_s – апріорний параметр, що враховує апріорне припущення, сформоване експертно або за навчальною вибіркою щодо типовості відповідної дії.

Із цих співвідношень випливає принципово важливий висновок: наявність усталених зв'язків, сформованих на основі досвіду лише для обмеженого класу задач, знижує ентропію та стабілізує модель поведінки оператора, тоді як зменшення кількості таких зв'язків призводить до зростання критичності прояву ДЧС.

Для уникнення надмірного ускладнення математичного апарату подальша ідентифікація ДЧС у роботі не подається через окрему систему додаткових енергетичних, асоціативних або антиципаційних функціоналів. Зазначені компоненти розглядаються як допоміжні інтерпретаційні ознаки, що пояснюють природу часової дезорганізації, але не замінюють базову процедуру прийняття рішень. Основним розрахунковим ядром залишається інтегральний індикатор прояву ДЧС $I_D(e)$, порогове правило класифікації $D(e)$, модель очікуваного прояву ДЧС на траєкторії M_D та ентропійний показник невпорядкованості вибору дій. Такий підхід дає змогу зберегти формальну строгість моделі без введення надлишкових символічних конструкцій. Суб'єктивна ентропія може розглядатися як формалізований показник ступеня розбалансування внутрішнього механізму дій оператора в умовах часового дефіциту, інформаційної перенасиченості або порушення звичного сценарію маневрування.

Отже, представлена формальна система дає змогу визначити механізм формування індивідуальних часових кодів і встановити умови активації відповідних часових кодів у критичних навігаційних ситуаціях. У прикладному аспекті це означає можливість переходу від загального опису часової дисторсії

до її непрямої ідентифікації за реально спостережуваними часово-поведінковими і траєкторними ознаками [255].

Для ілюстрації прикладного використання запропонованого підходу розглянуто траєкторії руху судна в локації Босфор. У межах розділу 4 ці матеріали використовуються для пояснення логіки формування ознак ДЧС, побудови багатокритеріального правила і непрямої інтерпретації часово-поведінкових відхилень. Повна експериментальна інтерпретація відповідних інтервалів наведено в розділі 6.

Перш за все розглянемо вплив фактора «autopilot» (автопілот) на наступні вибірки за численними змінними-параметрами судна: «rpm_port» (частота обертання гребного гвинта лівого борту), «distance» (відстань, пройдена судном від початку вправи за даними пристрою LAG), «surge» (поздовжнє переміщення судна), «sway» (поперечне переміщення судна), «pitch» (диферент / кут кільової хитавиці), «yaw» (рискання / кут повороту навколо вертикальної осі), «roll» (крен, нахил судна навколо його поздовжньої осі), «heave» (лінійний вертикальний рух вгору/вниз). Побудуємо діаграми середніх значень для всіх параметрів з урахуванням фактора «autopilot» (рис. 4.13, 4.14).

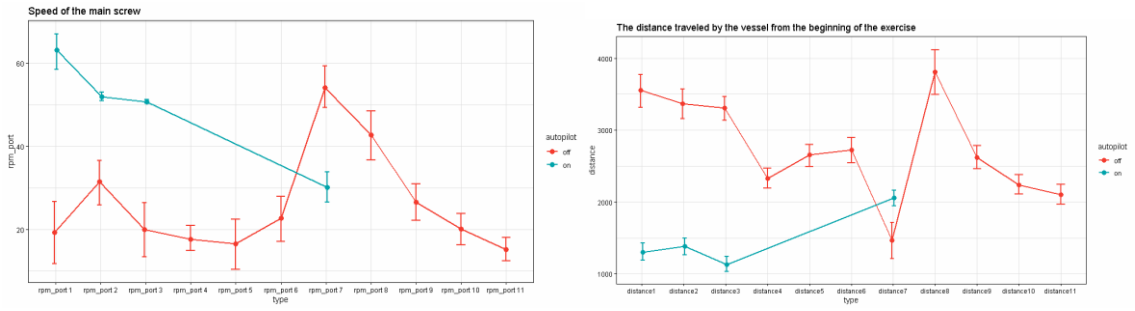


Рисунок 4.13. Діаграма довірчих інтервалів параметра «rpm_port», «distance»

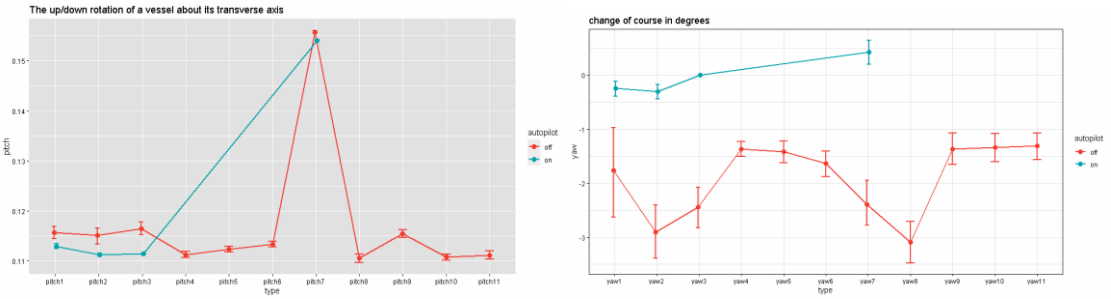


Рисунок 4.14. Діаграма довірчих інтервалів параметра «pitch», «yaw»

Як видно з рисунків 4.13, 4.14 за впливом фактора «autopilot» спостерігаються відмінності для першої, другої та сьомої вибірки, отже побудуємо для них окремі діаграми. Аналіз інших параметрів: «surge», «sway», «roll», «heave», також не змінює ситуації. Проведемо перевірку на гомогенність дисперсій, використовуючи критерій Левена для перевірки однорідності дисперсій. Проведемо аналіз за параметром «surge» (рис. 4.15).

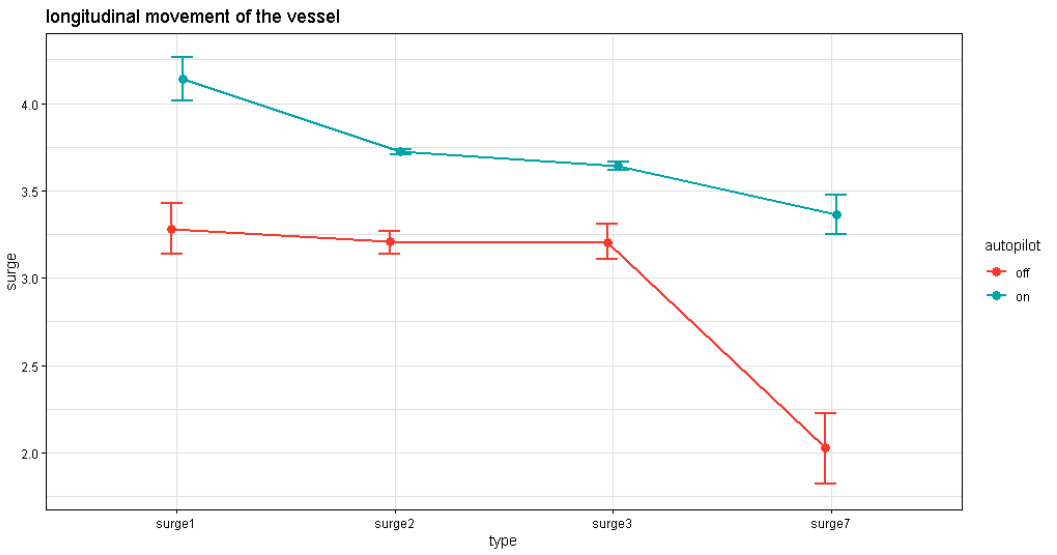


Рисунок 4.15. Діаграма довірчих інтервалів параметра «surge» для вибірок 1,2,3,7

Отримані статистичні результати свідчать про наявність відмінностей у параметрах руху судна між окремими вибірками та режимами керування. Найбільш виражені відмінності спостерігалися для параметра «surge», що може вказувати на зміну часово-поведінкової структури виконання маневру. Водночас статистично значуща різниця у параметрі руху сама по собі не є прямим доказом дисторсії суб'єктивного часу. Вона розглядається як непряма ознака, яка потребує зіставлення з часовими інтервалами дій, послідовністю мікрооперацій, контекстом навігаційної ситуації та, за можливості, зовнішніми психофізіологічними або експертними маркерами.

Для уникнення підміни статистичної відмінності прямою діагностикою ДЧС у роботі доцільно використовувати багатокритеріальне правило ідентифікації. Нехай e – фрагмент траєкторії або інтервал виконання дії. Для нього розраховуються три групи ознак:

$$S_e = \left\{ S_e^{stat}, S_e^{time}, S_e^{ben} \right\}, \tag{4.60}$$

де S_e^{stat} – статистична ознака відхилення параметрів руху судна; S_e^{time} – ознака виходу за нормативний або типовий часовий інтервал виконання дії; S_e^{ben} – ознака порушення типової послідовності мікрооперацій або перебудови стратегії дій.

Тоді фрагмент *e* може бути віднесений до потенційного прояву ДЧС лише за умови одночасного виконання щонайменше двох груп ознак:

$$D_e = 1 \ якщо \ S_e^{stat} + S_e^{time} + S_e^{ben} \geq 2. \tag{4.61}$$

де $D_e = 1$ означає наявність потенційного прояву ДЧС, а $D_e = 0$ – відсутність достатніх підстав для такої інтерпретації.

Якщо доступні зовнішні валідаційні дані, правило може бути посилене:

$$D_e = 1 \ if \ \ I_D(e) \geq \theta_D \wedge V_e = 1 \tag{4.63}$$

де I_{De} – інтегральний індикатор ДЧС; θ_D – порогове значення; V_e – зовнішня валідаційна ознака, отримана за результатами експертної розмітки, аналізу відео, eye-tracking, reaction-time tests або фізіологічних маркерів.

Для підвищення валідності ідентифікації ДЧС статистичні відмінності параметрів руху судна мають зіставлятися із зовнішніми джерелами верифікації. До таких джерел можуть належати: експертна розмітка відеозаписів дій оператора, фіксація часу реакції на зміну навігаційної ситуації, аналіз руху погляду за допомогою eye-tracking, показники частоти серцевих скорочень, варіабельності серцевого ритму, шкірно-гальванічної реакції, а також короткі післяекспериментальні опитувальники щодо суб’єктивного сприйняття часу, напруженості та складності завдання.

У разі відсутності таких зовнішніх маркерів результати статистичного аналізу слід формулювати як «непрямі ознаки можливого прояву ДЧС», а не як остаточно ідентифіковану дисторсію суб’єктивного часу. Такий підхід зберігає наукову коректність висновків і не ототожнює параметричну відмінність у русі судна з внутрішнім когнітивно-психофізіологічним станом оператора.

Таблиця 4.3. Джерела зовнішньої валідації проявів ДЧС

Джерело валідації	Предмет перевірки	Використання	Статус
Експертна розмітка відео	момент затримки, помилки, зміни стратегії	зіставляється з фрагментами траєкторії	рекомендоване
Eye-tracking	перемикання уваги, фіксації, звуження поля сприйняття	підтверджує зміну розподілу уваги	рекомендоване
Reaction-time tests	затримка реакції на подію	перевіряє часову дезорганізацію	рекомендоване
HR / HRV	фізіологічна напруженість	підтверджує стрес або перевантаження	допоміжне
Опитувальник після вправи	суб’єктивне сприйняття часу	підтверджує/спростовує самозвіт	допоміжне
Протокол дій у тренажері	послідовність мікрооперацій	основа для часової реконструкції	обов’язкове джерело валідації

Поєднання статистичних, часових і траєкторних індикаторів у межах запропонованої моделі створює основу для виокремлення фрагментів із нетиповою часово-поведінковою структурою виконання маневру. Узагальнюючи результати підрозділу, слід зазначити, що запропоновані формальні, алгоритмічні та статистичні підходи дали змогу сформувати первинну методику ідентифікації інтервалів дисторсії суб’єктивного часу оператора за фактичною траєкторією руху судна. У межах проведеної експериментальної постановки показано можливість зіставлення часових відхилень, перебудови послідовності дій, ентропії вибору та змін параметрів руху судна з імовірним проявом ДЧС.

Одержані результати мають характер первинної емпіричної апробації та підтверджують доцільність подальшого розвитку моделі. Водночас їх не слід інтерпретувати як остаточну універсальну валідацію для всіх типів суден, районів плавання та складів вахти.

4.3. Р-адична модель структурної ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора та адаптивного керування навігаційною безпекою

У попередніх підрозділах було показано, що людський фактор у системах навігаційного забезпечення не може розглядатися як зовнішнє випадкове збурення, оскільки він є внутрішнім компонентом ергатичного контуру керування, що безпосередньо впливає на просторово-часову організацію руху судна, повноту сприйняття інформаційного поля, швидкість виконання мікрооперaційного циклу та якість прийняття рішень.

Відповідно, у цьому підрозділі основною проблемою є не лише виявлення причин виникнення таких станів, а й побудова формального апарату для визначення найближчих можливих станів відносно поточного, оцінювання їх структурної близькості та подальшого використання цієї інформації в задачах адаптивного управління навігаційною безпекою. Така постановка дає змогу розглядати ментально-мотиваційний стан оператора як одну з внутрішніх координат ергатичної системи, від якої залежать конфігурація уваги, стійкість поведінкової стратегії, схильність до помилки та своєчасність коригувального рішення.

Попри наявність низки наукових праць, що описують мотиваційні стани особистості, причини їх виникнення та психологічні наслідки, механізми формування простору таких станів щодо специфічного професійного досвіду оператора, а також навігаційного контексту та поточного рівня його інформаційного навантаження залишаються недостатньо формалізованими. Саме ця обставина робить доречним розробку і застосування відповідного математичного апарату, який дав би змогу подати ментально-мотиваційні стани не як фрагментований опис, а як ієрархічно організований простір із чітко заданими правилами кодування, порівняння і переходу між станами [266, 235].

З огляду на це, формування простору ментально-мотиваційних станів оператора доцільно підпорядкувати таким базовим принципам.

По-перше, простір ментально-мотиваційних станів має розглядатися як ієрархічний, оскільки самі стани формуються під впливом різнорівневих сигналів інформаційного поля оператора – від базових: сприйняття і регламентних до ситуаційно-ризикових та особистісно-ціннісних.

По-друге, кожний стан і його складові ідентифікатори повинні бути однозначно визначеними та відокремленими один від одного, щоб виключити перетин або змішування класів під час автоматизованої ідентифікації.

По-третє, розподіл станів має спиратися на головну структуроутворювальну ознаку, яка визначає деревоподібну організацію всього простору і дає змогу впорядкувати переходи від загальніших до більш деталізованих характеристик.

По-четверте, умовно прийнятий мотиваційний простір доцільно подати у формі геометрично й числово впорядкованої системи, де кожний окремий стан концентрується у відповідній вузловій точці.

Зазначені принципи підводять до висновку, що серед наявних математичних підходів саме *p*-адичний підхід є одним із найпридатніших для формального опису такого простору [310].

У строгому математичному сенсі *p*-адична метрика визначається для простого *p*; тому в прикладній реалізації з основою $b = 4$ у роботі використовується не *p*-адичне поле, а *b*-основна ієрархічна система кодування, побудована за *p*-адичним принципом вкладеності та структурної близькості кодів [344]. Отже, *p*-адична структура виконує роль математичного апарату для подання вже визначених класів станів у вигляді ієрархічної карти.

Тому використання *p*-адичних чисел слід розглядати як спосіб формального подання відношень між станами, їх близькості, вкладеності та можливих переходів у межах ергатичної системи навігаційного забезпечення.

Для забезпечення коректності *p*-адичної класифікації ментально-мотиваційних станів необхідно передбачити окрему процедуру валідації. Вона має включати три рівні: експертну, психометричну та статистичну перевірку.

На першому рівні формується експертна матриця відповідності між поведінковими ознаками, інформаційними сигналами та класами ментально-мотиваційних станів. Узгодженість експертних рішень може оцінюватися за коефіцієнтом каппа Коена для двох експертів або каппа Флейса для групи експертів:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}, \tag{4.64}$$

де P_o – фактична частка узгоджених класифікацій; P_e – очікувана частка випадкової узгодженості.

На другому рівні перевіряється надійність шкал або груп ознак, які використовуються для віднесення оператора до певного класу стану. Якщо стан визначається через кілька індикаторів, внутрішня узгодженість може бути оцінена за коефіцієнтом Кронбаха:

$$\alpha = \frac{k}{k-1}\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k}\sigma_i^2}{\sigma_T^2}\right), \tag{4.65}$$

де k – кількість індикаторів шкали; σ_i^2 – дисперсія i-го індикатора; σ_T^2 – дисперсія сумарного показника.

На третьому рівні перевіряється дискримінантна валідність, тобто здатність запропонованої системи ознак розрізняти різні ментально-мотиваційні стани. Для цього можуть застосовуватися факторний аналіз, кластерний аналіз, аналіз міжгрупових відмінностей або класифікаційна перевірка. Якщо стани, закодовані p-адично, не розділяються за незалежними поведінковими або психодіагностичними ознаками, така класифікація має розглядатися лише як формальна таксономія, а не як валідована модель психологічних станів.

Таблиця 4.4. Порівняння p-адичної моделі з альтернативними підходами до класифікації ментально-мотиваційних станів

Підхід	Предмет опису	Перевага	Обмеження
Таксономія на основі правил	класифікація станів за правилами	проста, прозора, легко перевіряється	слабко описує ієрархічну близькість станів
Факторний аналіз	приховані фактори за групами ознак	дає статистично обґрунтовану структуру	потребує достатньої вибірки
Кластерний аналіз	групування подібних профілів	виявляє природні групи	залежить від метрики та масштабу
Приховані марковські моделі	приховані стани за спостереженнями	добре описує латентні переходи	потребує великих даних

p-адична модель	ієрархічне кодування та близькість станів	добре описує вкладеність, дискретність, ієрархію	потребує окремої валідації

У цій постановці *p*-адична відстань між двома кодами станів інтерпретується як структурна близькість у прийнятій системі кодування. Психологічний зміст такої близькості має підтверджуватися окремо – через експертні оцінки, поведінкові дані, психодіагностичні шкали або статистичну перевірку роздільності класів.

Формально *p*-адична відстань може бути подана як:

$$d_p(x,y) = p^{-v_p(x-y)} \tag{4.66}$$

де $v_p(x-y)$ – найбільший ступінь числа p, на який ділиться різниця $x-y$. Однак у прикладному змісті цієї роботи така відстань використовується як інструмент структурного впорядкування кодів.

З огляду на це, при побудові мотиваційного простору припускається, що в кожний конкретний момент часу для кожного оператора актуалізується лише один стан, який генерується зовнішніми інформаційними сигналами і формує відповідний вектор:

$$x = \sum_{k=0}^{N} a_k p^k,\ a_k \in \{0,1,...,p-1\}, \tag{4.67}$$

де p – основа *p*-адичного кодування; N – довжина коду;

a_k – значення k-го розряду коду.

$$a_k = \chi_k(s),\ \chi_k : S \to \{0,1,...,p-1\}. \tag{4.68}$$

де $s \in S$ – ідентифікований ментально-мотиваційний стан.

У свою чергу, кодування станів та дій між ними здійснюється за допомогою мангеттенської відстані між векторами цифрових кодів (4.69):

$$\rho(x,y) = \sum_{j=0}^{N} |\alpha_j - \beta_j|,\ x = (\alpha_j),\ y = (\beta_j). \tag{4.69}$$

Це створює можливість формального опису ментально-мотиваційних станів через асоціативний ряд ієрархічної структури. Подальший формальний опис задається співвідношеннями (4.70)–(4.71).

Множина ментально-мотиваційних станів:

$$S = \{s_1, s_2, ..., s_n\} \tag{4.70}$$

Множина *p*-адичних кодів станів:

$$C_p = \left\{ c(s) = \sum_{k=0}^{N} a_k(s)\, p^k \mid a_k(s) \in \{0,1,..., p-1\} \right\} \tag{4.71}$$

Відображення кодування: $\varphi : S \to C_p,\ \varphi(s) = c(s)$.

Відображення декодування: $\varphi^{-1} : C_p \to S,\ \varphi^{-1}(c(s)) = s$.

Множина керувальних дій: $B = \{b_1, b_2, ..., b_q\}$.

Відображення стану в керувальну дію:

$$\psi : S \to B. \tag{4.72}$$

Або через код:

$$\psi_p : C_p \to B,\ \psi_p(c(s)) = \psi(s). \tag{4.73}$$

Тут S – простір станів, C_p – простір *p*-адичних кодів, B – множина керувальних дій, φ – кодування стану, φ^{-1} – декодування, ψ – вибір дії за ідентифікованим станом.

Відповідно до прийнятого принципу незмішуваності станів, числа, що використовуються для їх кодування, мають бути цілими. Крім того, значущі зовнішні сигнали α_j, які потрапляють у поле уваги оператора, мають різний ступінь впливу – від домінантного α_0 до менш значущих елементів. Унаслідок цього розташування підмножин простору ментально-мотиваційних станів визначається не лише зовнішніми сигналами, а й досвідом оператора, уже сформованими моделями поведінки та його початковим станом.

Тому перехід до нового ментально-мотиваційного стану можливий лише з урахуванням попереднього шляху його трансформації. Нові сигнали можуть бути подані таким співвідношенням:

$$f : Z_p \to Z'_p, \quad x \to f(x), \tag{4.74}$$

де Z_p – простір кодів станів у момент t, так само як Z_p' – на момент t+1. За такої постановки ефект «притягування» $A(x_0) = \{x \in Z_p : |x|_p = 1\}$ нового стану можна описати відносно умови x_0, що створює підстави для побудови карти основних ментально-мотиваційних станів у межах *p*-адичної системи.

У прикладній реалізації моделі використовується чотирирівневе ієрархічне кодування станів, де основа запису b=4 відповідає кількості градацій ознаки в кожному розряді. Тому надалі для випадку b=4 йдеться не про p-адичне поле у строгому алгебраїчному сенсі, а про b-основну ієрархічну систему кодування, у якій близькість станів визначається збігом молодших розрядів коду:

$$x = \sum_{j=0}^{N-1} \alpha_j b^j,\ \alpha_j \in \{0,1,...,b-1\}.$$

Для прикладного випадку b = 4:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 4 + \alpha_2 \cdot 4^2 + ... + \alpha_{N-1} \cdot 4^{N-1},\ \alpha_j \in \{0,1,2,3\}. \quad (4.75)$$

Близькість двох кодів можна визначити через кількість збіжних молодших розрядів:

$$\rho_b(x,y) = \max\{r \in \mathbb{N}_0 : x \equiv y \ (\mathrm{mod}\ b^r)\},\ x \neq y \quad (4.76)$$

$$d_b(x,y) = \begin{cases} 0, & x = y, \\ b^{-\rho_b(x,y)} & x \neq y. \end{cases} \quad (4.77)$$

Отже, чим більше молодших розрядів збігається у кодах двох станів, тим більшою є величина $\rho_b(x, y)$ і тим меншою є відстань $d_b(x, y)$. Умова структурної близькості станів має вигляд:

$$d_p(x,y) \le b^{-r} \Leftrightarrow x \equiv y \left(\mathrm{mod} b^r\right),\ r \in \mathbb{N}_0. \quad (4.78)$$

Таким чином, b-основна ієрархічна відстань відображає не звичайну арифметичну різницю між числовими кодами, а глибину їхнього збігу в прийнятій ієрархічній структурі. Для забезпечення відтворюваності класифікації необхідно чітко визначити правило переходу від спостережуваних ознак до цифрового коду ментально-мотиваційного стану.

Загальна структура коду має вигляд:

$$Code(s) = \alpha_i, \delta_j, \varphi_k, \lambda_l, \gamma_m, \quad (4.79)$$

де s – ідентифікований ментально-мотиваційний стан оператора;

α_i – базова гілка мотиваційного простору;

δ_j – група функціональних або поведінкових ознак;

φ_k – конкретизована ознака в межах групи;

λ_l – рівень прояву ознаки;

γ_m – уточнювальний розряд, що відображає підсумкову належність до класу стану.

Для кожного розряду задається скінченна множина можливих значень:

$$\alpha_i, \delta_j, \varphi_k, \lambda_l, \gamma_m \in \{0,1,2,3\}. \quad (4.80)$$

Це означає, що кожний код формується не довільно, а за фіксованим правилом ієрархічного розбиття ознак. Перехід від реального спостереження до коду виконується через попередньо визначену таблицю декодування:

ознака → значення ознаки → розряд коду → підсумковий клас стану.

Таблиця 4.5. Правило кодування *p*-адичного коду ментально-мотиваційного стану

Розряд коду	Позначення	Кодування	Джерело ознаки	Інтерпретація
1-й	α_i	базова гілка мотиваційного простору	структура карти ММС	функціональна, професійна, соціальна або стратегічна група
2-й	δ_j	група поведінкових ознак	протокол дій, експертна оцінка	часові показники, безпека, командна взаємодія
3-й	φ_k	конкретизована ознака	ECDIS, RADAR/ARPA, журнал дій, відео	звернення до обладнання, контроль маршруту, комунікація
4-й	λ_l	рівень прояву ознаки	нормована шкала 0–3	відсутній, слабкий, помірний, сильний прояв
5-й	γ_m	уточнення класу стану	експертне або алгоритмічне правило	нормальний, нестійкий, напружений, критичний прояв

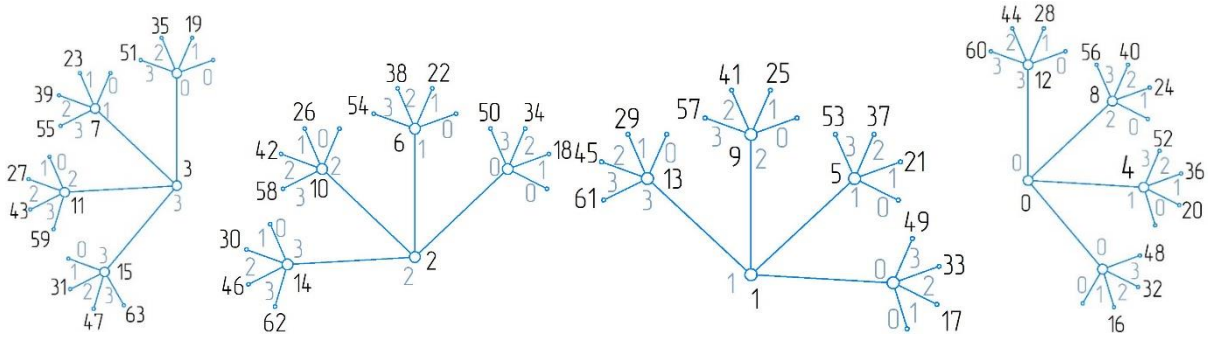
Тоді класифікаційний ряд має вигляд:

$1_{10} = 1_4$, …, $8_{10} = 20_4$, …, $16_{10} = 100_4$, …, $24_{10} = 120_4$, …, $32_{10} = 200_4$, …, $40_{10} = 220_4$, …, $48_{10} = 300_4$, …, $56_{10} = 320_4$, …, $64_{10} = 1000_4$. (4.81)

Розглянемо застосування цього підходу для формування ментально-мотиваційної карти оператора в її первинній формі для множини з 64 станів. Отримана карта ілюструє вузлові точки, що відповідають ментально-мотиваційним станам морського оператора. У термінах задачі дисертації це означає можливість виділення не лише самих станів, а й околів відповідних станів, що є важливим для виявлення найменш стійких і найбільш критичних

конфігурацій поведінки, здатних у подальшому призвести до небезпечного розвитку навігаційної ситуації.

Для практичної побудови карти пропонується використовувати методику визначення мотиваційної структури особистості, яка включає застосування опитувальника рівня наполягань особи та чотирьох комбінованих блоків уподобань морського оператора. У цій логіці отримані дані доцільно подати у вигляді інформаційної карти ментально-мотиваційного стану оператора як суб'єкта системи «людина-машина» в морському транспорті [215]. Найзручніше це здійснювати у вигляді графа з *p*-адичною фрактальною структурою, побудованого на основі неархімедових принципів теорії чисел [226]. Для побудови інформаційної карти мотивації оператора необхідно взяти *p*-адичність розмірності 4 і структурний ряд із чотирьох чисел δ, φ, λ, γ. Базові гілки карти ММС оператора мають позначки: α_0 (рис. 4.16, *г*); α_1 (рис. 4.16, *в*); α_2 (рис. 4.16, *б*); α_3 (рис. 4.16, *а*).



а *б* *в* *г*

Рисунок 4.16. Карта ментальних-мотиваційних станів оператора у трирозрядному кодуванні з основою 4: *а* – показники власної стратегії оператора; *б* – позиційні ознаки оператора в оточенні; *в* – ознаки саморозвитку оператора; *г* – функціональні показники за діяльністю

Однак з урахуванням складності та різноманітності об'єкта дослідження простір класифікаційних ознак доцільно розширити на два додаткові ієрархічні рівні кодування в *p*-адичній системі, де $4^3 = 64$, $4^5 = 1024$. Тобто загальна потужність п'ятирозрядного простору кодів за основи $b = 4$ становить

$4^5 = 1024$. Кожна гілка першого рівня α_i містить $4^4 = 256$ кодів; кожна підгілка $\alpha_i\delta_j - 4^3 = 64$ коди.

Це дає змогу перейти від первинної карти станів до більш глибокої ієрархії структурної ідентифікації, яка вже придатна для роботи в задачах автоматизованого розпізнавання (рис. 4.17).

Для практичної реалізації зазначеного підходу в роботі розроблено інформаційну схему інтелектуальної автоматизованої системи ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора. На цій схемі наведені вхідні та вихідні сигнали системи, а для визначення складових інформаційних сигналів у *p*-адичній системі використано ієрархічне кодування.

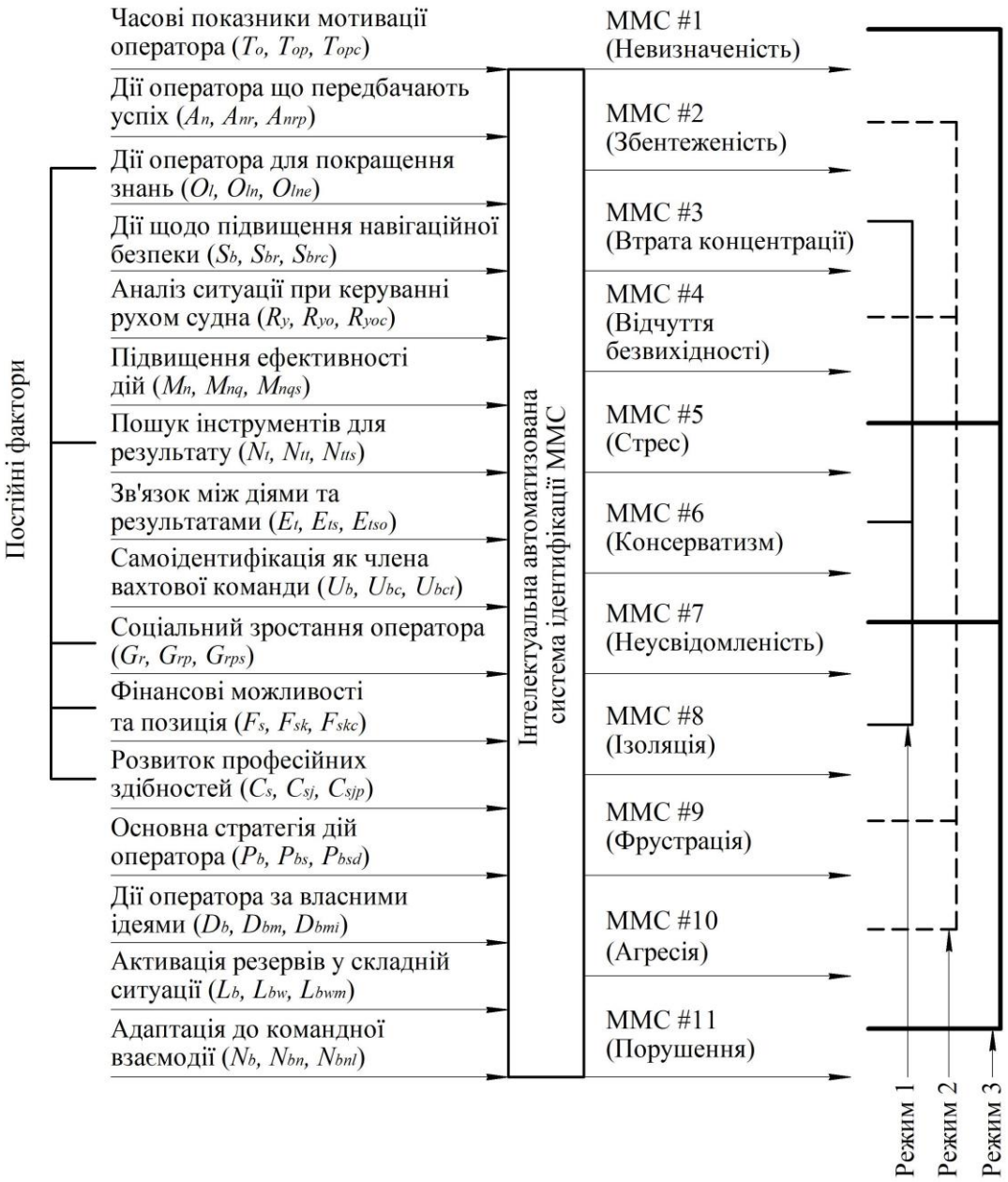


Рисунок 4.17. Вхідні та вихідні сигнали інтелектуальної системи ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора

Отже, структура класифікації мотиваційних станів оператора, типу, $\alpha_{i\delta_j\varphi_k\lambda_n\gamma_m}$, де i = 0…3, буде представлена ієрархічною комбінацією розрядів коду:

1. $\alpha_0 \rightarrow \alpha_{0\delta_0}$ – часові показники мотивації оператора$\rightarrow \alpha_{0\delta_0\varphi_{0\ldots3}}$ (ідентифікатор) – якість мотивації: наскільки оператор впевнений, що його дії важливі для успішного виконання завдання (T_o – час на виконання загальних операцій із навігаційним обладнанням)$\rightarrow \alpha_{0\delta_0\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}}$ – бере участь у плануванні та реалізації маршруту (T_{op} – час на створення та супровід маршруту в ECDIS та за даними GNSS/GPS)$\rightarrow \alpha_{0\delta_0\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}\gamma_{0\ldots3}}$ – рівень відповідальності під час підготовки та корректури електронних навігаційних карт та налаштувань навігаційного обладнання (T_{opc} – час на створення коректурних елементів електронної картографії).

Ментальний мотиваційний стан #1 (Невизначеність): a00002, a00102 (де a – номер дослідження, у цьому прикладі a=1): 00320, 00332, 00301, 00301, 00002, 00011, 00023, 00030, 00102, 00113, 00121, 00133, 00203, 00211, 00221, 00233

2. $\alpha_0 \rightarrow \alpha_{0\delta_1}$ – дії оператора що передбачають успіх$\rightarrow \alpha_{0\delta_1\varphi_{0\ldots3}}$ (ідентифікатор) – орієнтація мотивації: наскільки ясно оператор розуміє, що слід зробити для досягнення успіху (A_n – чіткість та послідовність дій з навігаційним обладнанням)$\rightarrow \alpha_{0\delta_1\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}}$ – ясно розуміє, які дії слід виконати (A_{nr} – послідовність дій із перевіркою, зв'язок «джерело інформації – дія»)$\rightarrow$ $\alpha_{0\delta_1\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}\gamma_{0\ldots3}}$ – розуміє, як вітер, течія та інші фактори можуть впливати на рух судна і вживає заходів для утримання вказаної швидкості та курсу (A_{nrp} – дії, що передбачають відповідні математичні розрахунки).

Ментальний мотиваційний стан #2 (Збентеженість): a01001, a01010, a01100: 01001, 01010, 01022, 01032, 01100, 01110, 01121, 01132, 01203, 01210, 01220, 01233, 01300, 01310, 01323, 01331

3. $\alpha_0 \rightarrow \alpha_{0\delta_2}$ – дії оператора для покращення знань$\rightarrow \alpha_{0\delta_2\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – здатність до самоорганізації: наскільки оператор готовий до самоосвіти (O_l – кількість запитів до фахової літератури)$\rightarrow \alpha_{0\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – готовий вдосконалювати свої навігаційні навички (O_{ln} – кількість запитів до нової навігаційної літератури) $\rightarrow$ $\alpha_{0\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – вивчення нових методів навігації та навігаційного обладнання за різних погодних умов і морських маршрутів (O_{lne} – кількість запитів до спеціалізованих навігаційних курсів).

Ментальний мотиваційний стан #1 (Невизначеність): a02000, a02101, a02010: 02000, 02111, 02302, 02003, 02310, 02311, 02222, 02023, 02122, 02101, 02010, 02123, 02021, 02301, 02232, 02312

4. $\alpha_0 \rightarrow \alpha_{0\delta_3}$ – дії щодо підвищення навігаційної безпеки$\rightarrow \alpha_{0\delta_3\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – прив’язка до безпеки: наскільки оператор готовий прагнути забезпечити безпеку (S_b – відсутні відхилення від нормативного часу заповнення контрольних листів)$\rightarrow \alpha_{0\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – готовий докласти зусиль для забезпечення безпеки судна (S_{br} – перевірка параметрів безпеки навігаційних приладів)$\rightarrow \alpha_{0\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – контроль трафіку, своєчасне повідомлення про будь-яку небезпеку, особливо під час наближення до порту та входження у вузькості тощо (S_{brc} – контроль/перевірка параметрів безпеки у діях вахтової команди).

Ментальний мотиваційний стан #3 (Втрата концентрації): a03001, a03010: 03202, 03131, 03002, 03203, 03331, 03020, 03011, 03101, 03223, 03122, 03001, 03312, 03210, 03303, 03320, 03010.

5. $\alpha_1 \rightarrow \alpha_{1\delta_0}$ – аналіз ситуації при керуванні судном$\rightarrow \alpha_{1\delta_0\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – рівень сконцентрованості на досягненні результату: оператор вважає, що результат впливає на його впевненість (R_y – комп’ютерний аналіз напряму та зосередження погляду штурманів)$\rightarrow$ $\alpha_{1\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – виявляє великий інтерес до результатів своєї роботи (R_{yo} – перевірка показників руху судна після виконаних дій)$\rightarrow \alpha_{1\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – обговорює результати своєї роботи з капітаном (R_{yoc} – аналіз запитів до розмов із капітаном, повідомлень).

Ментальний мотиваційний стан #4 (Відчуття безвихідності): a10000: 10120, 10011, 10330, 10000, 10211, 10131, 10232, 10003, 10013, 10322, 10220, 10321, 10133, 10222, 10201, 10123.

6. $\alpha_1 \rightarrow \alpha_{1\delta_1}$ – підвищення ефективності дій$\rightarrow \alpha_{1\delta_1\varphi_{0\ldots3}}$ (ідентифікатор) – рівень впевненості в своїх здібностях: наскільки оператор готовий підвищити ефективність своєї роботи та використовувати нові методи та підходи (M_n – комп'ютерний аналіз нестандартних дій та послідовностей)$\rightarrow \alpha_{1\delta_1\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}}$ – шукає нові методи та підходи з метою підвищення ефективності своєї роботи (M_{nq} – пошук даних про швидкі та ефективні рішення)$\rightarrow \alpha_{1\delta_1\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}\gamma_{0\ldots3}}$ – вивчає останні наукові та технологічні досягнення у галузі навігації (M_{nqs} – пошук даних про нові навігаційні технічні засоби, аналіз застосування нових режимів роботи обладнання).

Ментальний мотиваційний стан #5 (Стрес): a11200, a11000: 11330, 11320, 11312, 11302, 11233, 11220, 11210, 11200, 11130, 11123, 11111, 11102, 11033, 11021, 11012, 11000.

7. $\alpha_1 \rightarrow \alpha_{1\delta_2}$ – пошук інструментів для результату$\rightarrow \alpha_{1\delta_2\varphi_{0\ldots3}}$ (ідентифікатор) – гнучкість мислення та здатність до навчання: наскільки оператор готовий вивчати нові інструменти (обладнання) (N_t – звернення до капітана / судноплавної компанії щодо встановлення нового обладнання)$\rightarrow$ $\alpha_{1\delta_2\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}}$ – готовий вивчати нові технології (N_{tt} – пошук та вивчення технологій роботи із комплексом нового обладнання)$\rightarrow \alpha_{1\delta_2\varphi_{0\ldots3}\lambda_{0\ldots3}\gamma_{0\ldots3}}$ – вивчає нове програмне забезпечення та додатки для навігації, методи обробки даних (N_{tts} – пошук та вивчення програмних/системних модулів для нового обладнання).

Ментальний мотиваційний стан #6 (Консерватизм): a12010: 12330, 12321, 12312, 12302, 12232, 12221, 12212, 12201, 12130, 12122, 12111, 12103, 12030, 12021, 12010, 12003.

8. $\alpha_1 \rightarrow \alpha_{1\delta_3}$ – зв'язок між діями та результатами$\rightarrow \alpha_{1\delta_3\varphi_{0\ldots3}}$ (ідентифікатор) – рівень усвідомлення власної ролі: наскільки оператор свідомий своєї ролі та відповідальності в забезпеченні безпеки та ефективності виконуваної роботи

(E_t – аналіз дій із обладнанням, що відповідає його статусу)$\rightarrow \alpha_{1\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – свідомий своєї ролі та відповідальності у забезпеченні навігаційної безпеки (E_{ts} – аналіз дій з обладнанням під час перевірки та налаштування параметрів відповідно до посадових обов'язків)$\rightarrow \alpha_{1\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – контролює точність та актуальність навігаційних даних, передає іншим членам екіпажу професійний досвід і надає рекомендації (E_{tso} – аналіз дій із обладнанням, оптимально та відповідно до ситуації).

Ментальний мотиваційний стан #7 (Несвідомість): a13300, a13010: 13031, 13110, 13221, 13300, 13003, 13132, 13222, 13320, 13010, 13123, 13232, 13303, 13033, 13130, 13212, 13313.

9. $\alpha_2 \rightarrow \alpha_{2\delta_0}$ – самоідентифікація як члена вахтової служби$\rightarrow \alpha_{2\delta_0\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – мотивація до співпраці та командної роботи: оператор цінує свою роль у команді та прагне співпрацювати з іншими членами екіпажу (U_b – щільність взаємодії, аналіз переміщень по капітанському містку)$\rightarrow \alpha_{2\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – активна участь в обговоренні навігаційних питань та прийнятті рішень (U_{bc}, щільність взаємодії, аналіз доповідей капітану/пропозицій)$\rightarrow \alpha_{2\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – співпраця з іншими професіоналами на борту, такими як суднові механіки та електромеханіки (U_{bct} – аналіз запитів до механіків, електромеханіків з питань оптимізації управління рухом судна).

Ментальний мотиваційний стан #8 (Ізоляція): a20200, a20001: 20331, 20320, 20312, 20303, 20231, 20222, 20212, 20200, 20132, 20122, 20113, 20103, 20032, 20020, 20013, 20001.

10. $\alpha_2 \rightarrow \alpha_{2\delta_1}$ – соціальне зростання оператора$\rightarrow \alpha_{2\delta_1\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – мотивація задоволення соціальних потреб: оператор прагне до соціального визнання своєї роботи та успіху (G_r, запити щодо рекомендацій з боку капітана/компанії)$\rightarrow \alpha_{2\delta_1\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – активна участь у презентаціях та звітах про роботу екіпажу (G_{rp} – кількісні та якісні показники участі)$\rightarrow \alpha_{2\delta_1\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – участь у прес-конференціях та інтерв'ю, а також у публікації статей у фахових журналах про свою роботу (G_{rps} – кількісні та якісні показники публікацій).

Ментальний мотиваційний стан #9 (Фрустрація): a21110: 21212, 21302, 21321, 21110, 21203, 21132, 21031, 21333, 21210, 21113, 21320, 21222, 21123, 21230, 21030, 21301.

11. $\alpha_2 \rightarrow \alpha_{2\delta_2}$ фінансові можливості та позиція$\rightarrow \alpha_{2\delta_2\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – мотивація до матеріальної винагороди: оператор спрямований на отримання фінансової винагороди за свою роботу і прагне до фінансової безпеки (F_s – запити щодо підвищення фінансування до компанії)$\rightarrow \alpha_{2\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – прагне до фінансової безпеки, може активно брати участь у конкуренції за збільшення зарплати та за поліпшення умов праці на борту (F_{sk} – запити щодо підвищення фінансування до капітана)$\rightarrow \alpha_{2\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – прагнення працювати на суднах з вищими заробітними платами (F_{skc} – запити щодо отримання посади на інших суднах/компаніях).

Ментальний мотиваційний стан #9 (Фрустрація): a22300: 22121, 22213, 22331, 22020, 22300, 22222, 22113, 22201, 22232, 22011, 22133, 22303, 22112, 22320, 22003, 22021.

12. $\alpha_2 \rightarrow \alpha_{2\delta_3}$ розвиток професійних здібностей$\rightarrow \alpha_{2\delta_3\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – мотивація до професійного зростання та розвитку: оператор прагне покращити свої професійні навички та знання (C_s – звернення щодо навчання та участь у програмах підготовки)$\rightarrow \alpha_{2\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – участь у подальшому освітньому та тренувальному процесі, читання спеціалізованої літератури (C_{sj} – запити/участь щодо роботи у центрах підготовки)$\rightarrow \alpha_{2\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – обмін досвідом з іншими професіоналами цієї галузі (C_{sjp} – участь у роботі провідних центрів підготовки моряків).

Ментальний мотиваційний стан #9 (Фрустрація): a23110: 23220, 23131, 23030, 23222, 23022, 23321, 23132, 23203, 23110, 23012, 23302, 23112, 23211, 23113, 23032, 23210.

13. $\alpha_3 \rightarrow \alpha_{3\delta_0}$ основна стратегія дій оператора$\rightarrow \alpha_{3\delta_0\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – які цінності визначають основні дії оператора: пріоритетний вибір оператора (P_b – ознаки певної стратегії дій, власні рішення)$\rightarrow \alpha_{3\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – безпека людей

(P_{bs} – визначення стратегії безпеки, а не економії палива)$\rightarrow \alpha_{3\delta_0\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – оператор рекомендує змінити маршрут або сповільнити хід судна, навіть якщо це затримає доставку вантажу та призведе до фінансових втрат (P_{bsd}, готовність приймати складні рішення згідно зі стратегією безпеки).

Ментальний мотиваційний стан #10 (Агресія): a30100: 30003, 30320, 30301, 30032, 30211, 30131, 30220, 30010, 30100, 30112, 30133, 30030, 30232, 30302, 30210, 30322.

14. $\alpha_3 \rightarrow \alpha_{3\delta_1}$ дії оператора за власними ідеями$\rightarrow \alpha_{3\delta_1\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – як особистий досвід та переконання оператора впливають на його рішення та дії в складних ситуаціях: пріоритет для особистих підходів (D_b – фіксація нестандартних, але свідомих дій)$\rightarrow \alpha_{3\delta_1\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – оператор може запропонувати свій власний метод визначення положення судна або маневрування (D_{bm}, фіксація нестандартних маневрів, відмова від використання автопілота)$\rightarrow$ $\alpha_{3\delta_1\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – демонструє свій метод іншим членам екіпажу і переконується, що вони розуміють його принципи (D_{bmi} – впровадження власних методів, публікації, виступи).

Ментальний мотиваційний стан #1 (Невизначеність): a31002: 31002, 31113, 31211, 31033, 31221, 31302, 31332, 31131, 31220, 31031, 31321, 31322, 31301, 31111, 31012, 31203.

15. $\alpha_3 \rightarrow \alpha_{3\delta_2}$ активація резервів у складній ситуації$\rightarrow \alpha_{3\delta_2\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – як оператор використовує свої внутрішні ресурси: здатність керувати емоціями, концентрація уваги, фізична витривалість (L_b – рівень стресу, пульс та сатурація крові)$\rightarrow \alpha_{3\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – за складних погодних умов, оператор може використати свої навички емоційної саморегуляції (L_{bw} – рівень стресу, пульс та сатурація крові у штормі)$\rightarrow \alpha_{3\delta_2\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – концентрується на виконанні своїх навігаційних обов’язків та завдань. Використовує методи управління емоціями (L_{bwm} – рівень стресу, пульс та сатурація крові в періоди високої розумової активності).

Ментальний мотиваційний стан #5 (Стрес): a32020: 32013, 32332, 32121, 32230, 32020, 32301, 32313, 32032, 32111, 32320, 32203, 32102, 32031, 32311, 32122, 32220.

16. $\alpha_3 \rightarrow \alpha_{3\delta_3}$ адаптація до командної взаємодії$\rightarrow \alpha_{3\delta_3\varphi_{0...3}}$ (ідентифікатор) – здатність працювати в команді: адаптація до нових людей та ситуацій (N_b – рівень стресу, пульс та сатурація крові в період спілкування із членами команди)$\rightarrow \alpha_{3\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}}$ – оператор може провести додаткове навчання для новачків і працювати в тісній співпраці з новими членами екіпажу (N_{bn} – рівень стресу, пульс та сатурація крові в період спілкування із новими членами команди)$\rightarrow \alpha_{3\delta_3\varphi_{0...3}\lambda_{0...3}\gamma_{0...3}}$ – співпраця з новими багатомовними членами екіпажу (N_{bnl} – рівень стресу, пульс та сатурація крові в період спілкування із новими членами команди).

Ментальний мотиваційний стан #11 (Порушення): a33020, a33300: 33133, 33322, 33311, 33030, 33120, 33222, 33301, 33020, 33211, 33003, 33220, 33203, 33300, 33213, 33132, 33201..

Проведене числове моделювання в рамках прийнятої *p*-адичної структури: $\alpha \in \{ij333...ij000\}$: *ij*333, *ij*332, *ij*331, *ij*330, *ij*323, *ij*322, *ij*321, *ij*320, *ij*313, *ij*312, *ij*311, *ij*310, *ij*303, *ij*302, *ij*301, *ij*300, *ij*233, *ij*232, *ij*231, *ij*230, *ij*223, *ij*222, *ij*221, *ij*220, *ij*213, *ij*212, *ij*211, *ij*210, *ij*203, *ij*202, *ij*201, *ij*200, *ij*133, *ij*132, *ij*131, *ij*130, *ij*123, *ij*122, *ij*121, *ij*120, *ij*113, *ij*112, *ij*111, *ij*110, *ij*103, *ij*102, *ij*101, *ij*100, *ij*033, *ij*032, *ij*031, *ij*030, *ij*023, *ij*022, *ij*021, *ij*020, *ij*013, *ij*012, *ij*011, *ij*010, *ij*003, *ij*002, *ij*001, *ij*000.

Загальна потужність п’ятирозрядного простору становить $\alpha_i = 1024$, в кожній гілці, $\alpha_{i\delta_j} = 256$ в кожній підгілці $\alpha_{i\delta_j\varphi_k} = 64$, це вказує на можливість високої деталізації простору класифікаційних ознак ММС оператора. Слід уточнити, що інформаційна карта буде сформована для кожного оператора окремо. Це пов’язано з тим, що кодування станів для будь-якої точки карти в межах $\alpha_{i\delta_j\varphi_k\lambda_n\gamma_m}$, буде базуватися на ідентифікації окремого оператора під час вахти на ходовому містку.

Якщо певна ознака має нормоване значення $x_m \in [0;1]$, то її рівень можна кодувати таким чином:

$$d_m = \begin{cases} 0, & 0 \le x_m < \theta_1, \\ 1, & \theta_1 \le x_m < \theta_2, \\ 2, & \theta_2 \le x_m < \theta_3, \\ 3, & x_m \ge \theta_3. \end{cases} \tag{4.82}$$

де d_m – кодовий розряд відповідної ознаки;

θ_1, θ_2, θ_3 – порогові значення, задані експертно або отримані за статистичною вибіркою.

Підсумковий клас ментально-мотиваційного стану визначається за правилом:

$$MMC(s) = \arg\max_c S_c\left(Code(s)\right), \tag{4.83}$$

де $MMC(s)$ – клас ментально-мотиваційного стану;

$S_c(Code(s))$ – функція відповідності коду $Code(s)$ класу c.

У такому сенсі довгі числові ряди доцільно трактувати як результат застосування попередньо заданого правила кодування.

Маючи за мету отримати надійні дані для моделювання, упродовж 2019–2022 років були проведені експерименти в навігаційному тренажерному центрі з 54 операторами-судноводіями, використовуючи навігаційний симулятор NTPRO 5000.

Отримані дані дозволили уточнити принципи та підходи до формування простору класифікаційних ознак з потужністю простору 64 стани (рис. 4.16, *а*–*г*) та методи ідентифікації вузлів графа щодо кожного окремого курсанта-оператора.

Враховуючи об’єктивну складність, пов’язану з необхідністю ідентифікації критичних станів кожного окремого оператора в режимі реального часу, було запропоновано застосовувати інформаційну технологію штучних нейронних мереж.

Крім того, необхідність формування індивідуальної мотиваційної карти для кожного оператора зумовлена тим, що окремий ментально-мотиваційний

стан (ММС) формується в кожному вузлі графа. Згідно з експериментальними даними, певний стан у відношенні до групи вузлових точок на карті може призвести до значного стресу та втрати орієнтації, зниження концентрації оператора і, як наслідок, до значно більшої ймовірності аварії [201]. Водночас той самий код карти для іншого оператора не матиме такого ефекту на його психічний стан і не створить жодного ризику. Усе це вказує на те, що на області карти є індивідуальні тригерні коди, які асоціюються з проявами відповідних станів та впливають на ефективність несення навігаційної вахти і безпеку навігації в цілому. У свою чергу, існують загальні стани операторів, які найчастіше формуються в кожній окремій гілці/підгілці графа.

За ідентифікованими ММС можуть активуватися відповідні рекомендаційні або попереджувальні режими роботи ІСНЗ, спрямовані на підвищення ситуаційної обізнаності, залучення вахтового помічника або перехід до компенсуючих процедур керування.

Так, режим безпеки № 1 передбачає ініціювання попереджувального або рекомендаційного режиму ІСНЗ для відповідного оператора шляхом активації додаткових інформаційних сигналів-підказок, спрямованих на підвищення ситуаційної обізнаності та нормалізацію послідовності дій. Якщо протягом часу, визначеного відповідно до ситуаційного контексту, ознаки нестійкого ММС зберігаються, ініціюється режим безпеки № 2.

Режим безпеки № 2 передбачає активацію додаткового контрольного контуру з боку вахтового помічника або капітана. У цьому випадку ІСНЗ формує попереджувальне повідомлення про можливе зниження стійкості операторського стану та рекомендує посилення контролю, уточнення дій оператора або надання допомоги у режимі реального часу під час виконання задач управління рухом судна.

Режим безпеки № 3 застосовується для ситуацій, у яких зберігаються ознаки критичного ММС або підвищеного навігаційного ризику. У такому випадку ІСНЗ рекомендує перехід до компенсуючих процедур керування відповідно до суднових регламентів, активацію додаткових засобів контролю, виклик капітана на ходовий місток та, за потреби, використання

автоматизованих модулів підтримки керування відповідно до класу поточних маневрів і операцій (рис. 4.18). Отже, при виявленні відповідних ММС у роботі ІСНЗ можуть ініціюватися попереджувальні, рекомендаційні або компенсуючі режими, спрямовані на підвищення ситуаційної обізнаності, посилення контролю з боку вахтової команди та підтримання безпечного режиму керування судном у складних навігаційних умовах [281].

Загалом запропонована схема забезпечує реалізацію гнучкого адаптивного управління безпекою на морському транспорті. У такому поданні *p*-адична модель уже перестає бути лише класифікаційною схемою і перетворюється на формальний інструмент структурної ідентифікації внутрішніх станів оператора, пов’язаних із якістю мотивації, орієнтацією на успіх, готовністю до саморозвитку та пріоритетом навігаційної безпеки.

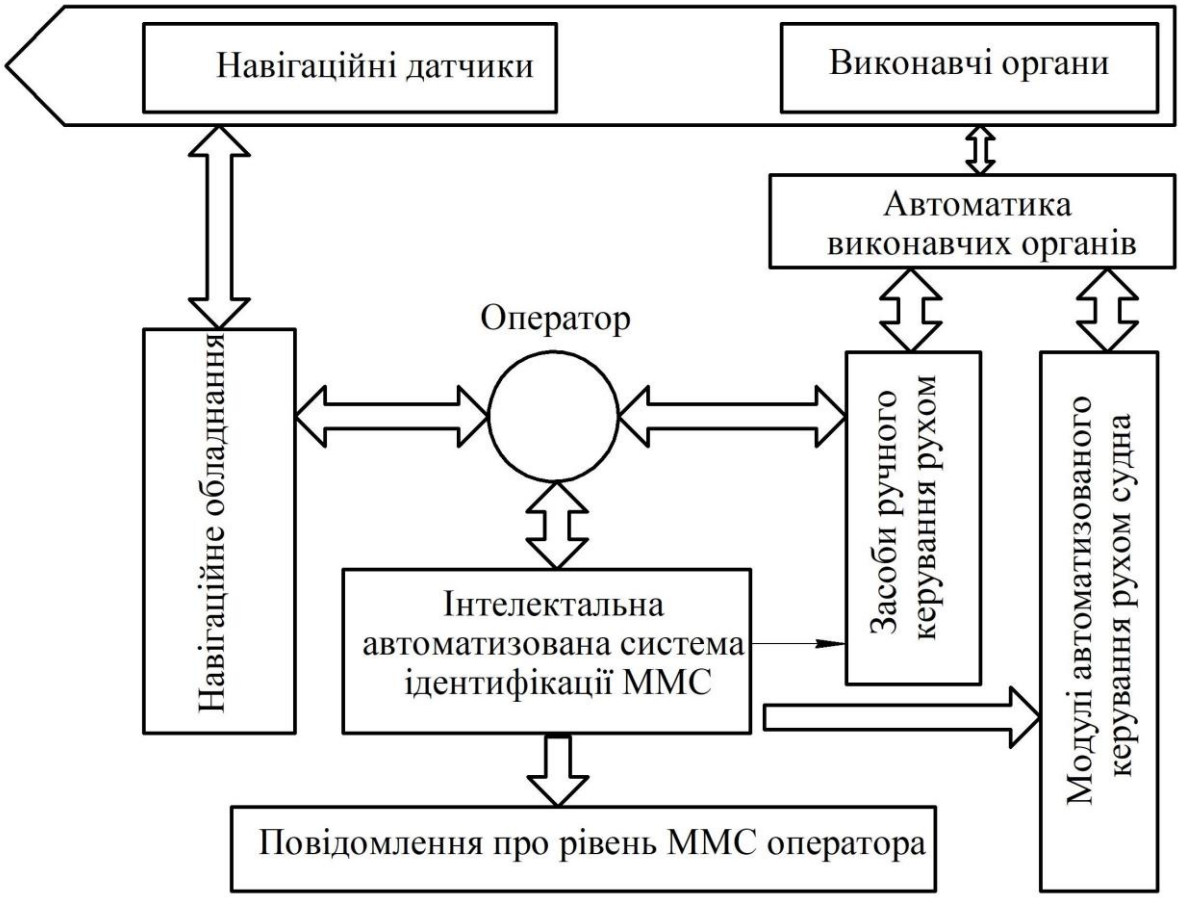


Рисунок 4.18. Принципова схема управління безпекою судноводіння у складних навігаційних ситуаціях

Запропонована схема безпосередньо продовжує логіку попередніх підрозділів, у яких увага, часові деформації, антиципація і суб’єктивна

ентропія вже були введені як компоненти єдиного діагностичного контуру стану оператора [353].

4.4. Логіко-геометричні моделі антиципації, мотиваційних екстремумів і поведінкових стратегій оператора у складних навігаційних ситуаціях

З урахуванням наведених вище положень було проведено експеримент із використанням сертифікованого навігаційного симулятора NTPRO 5000 у Херсонській державній морській академії. Для проведення експерименту було сформовано групу з 54 моряків-операторів, які виконували роль капітанів під час тренажерних занять із застосуванням Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) для навігації та керування судном. У ході експерименту було проаналізовано моделі поведінки операторів під час проходження протоки Босфор, цей район плавання характеризується високою щільністю трафіку та складними гідрографічними умовами. Перед початком експерименту кожен оператор виконував завдання з планування маршруту, аналізував карти, лоції, гідрометеорологічні умови та технічні характеристики судна.

У процесі експерименту аналіз дій операторів дав змогу сформувати траєкторії виконання операцій для двох базових стратегій: керування швидкістю судна та керування курсом. У більшості випадків ділянки маршруту, на яких виникала потреба у виборі стратегії, виникали в різні моменти протягом усього руху судна. Відповідно, протягом експерименту, оператори формували низку таких фрагментів траєкторії, кожен із яких був ланцюгом подій із різним порядком застосування відповідної стратегії.

Таким чином, оператори використовували дві базові стратегії *a* та *b*, що дало змогу геометрично подати відображення траєкторій їхньої поведінки в метричному просторі. Цю ситуацію подамо як групу $G = \langle a, b \mid \rangle$, де відсутні комутативні елементи. Породжувальні елементи також мають обернені елементи: a^{-1} *і* b^{-1}. Якщо додатні елементи а та *b* є діями з боку оператора, то від'ємні елементи a^{-1} *і* b^{-1} є проявами його антиципації та самоочікувань. Такий

підхід дає змогу інтегровано розв'язати задачу побудови множини точок мотиваційної антиципації в межах поведінкової траєкторії [203].

З урахуванням цих положень візуальне відображення поведінки оператора представимо у вигляді графа Келі (рис. 4.19). Для уникнення перетину ребер графа на кожному етапі візуалізації зменшуємо масштаб. Очевидно, що в цьому випадку спочатку було обрано стратегію *b; b²* повторено з огляду на можливий успіх; надалі застосовано $b^2\boldsymbol{a}$*;* після чого відбулося повернення до початкової стратегії у вигляді $b^2a\boldsymbol{b}$. Така стратегія відповідає інтуїтивному або автоматичному підходу, характерному для менш досвідчених операторів [212].

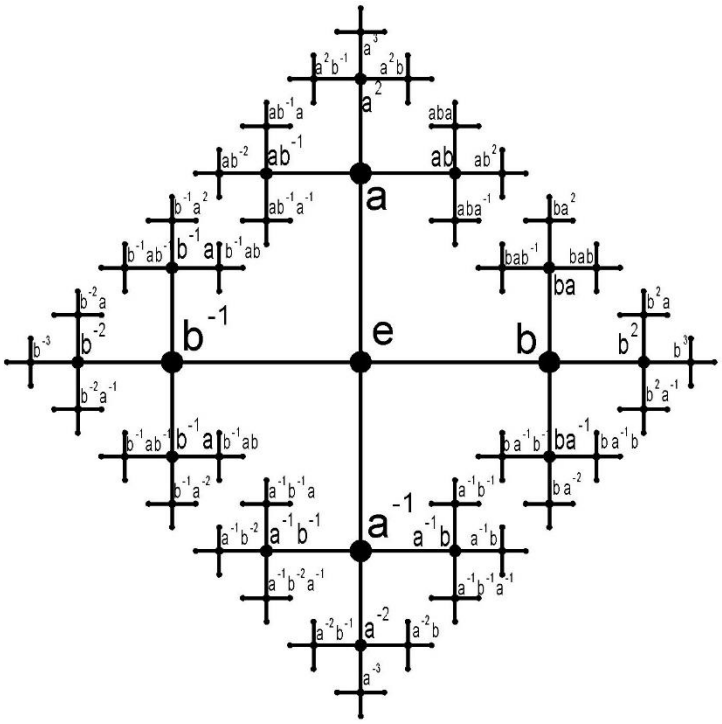


Рисунок 4.19. Граф Келі поведінки оператора

Наприклад, в одному індивідуальному випадку фрагмент траєкторії поведінки капітана з двома стратегіями мав такий вигляд (рис. 4.20):

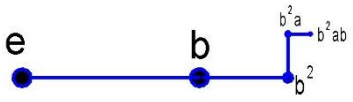


Рисунок 4.20. Ланка графа – траєкторія дій оператора

Аналіз індивідуальних траєкторій поведінки операторів показав, що граф Келі доцільно трактувати не як універсальну модель усіх можливих дій, а як спеціалізований інструмент структурного подання тих фрагментів поведінки, у яких наявні повторювані, циклічні, зворотні або комбіновані переходи між стратегіями (табл. 4.6). Для кількісного уточнення цього результату введено коефіцієнт структурного покриття графовою моделлю:

$$K_{\text{cov}} = \frac{N_{Cayley}}{N_{all}} \cdot 100\%, \tag{4.84}$$

де N_{all} – загальна кількість проаналізованих індивідуальних траєкторій або їхніх фрагментів; N_{Cayley} – кількість траєкторій або фрагментів, для яких послідовність дій може бути відображена у вигляді переходів графа Келі зі збереженням порядку дій, повторів, повернень і циклічних переходів.

Фрагмент траєкторії зараховувався до N_{Cayley}, якщо: 1) послідовність дій могла бути подана як послідовність вузлів і ребер графа; 2) у моделі зберігався порядок переходів між діями; 3) повторні, зворотні або циклічні переходи не втрачалися під час графового подання; 4) отримане подання дозволяло інтерпретувати зміну або повернення до попередньої стратегії.

Експеримент із залученням 54 операторів засвідчив, що значна частина індивідуальних поведінкових траєкторій може бути структурно подана за допомогою графа Келі. Із 54 проаналізованих індивідуальних траєкторій 43 відповідали встановленим критеріям структурного подання. Відповідно, коефіцієнт структурного покриття становив: K_{cov} = 43/54 = 0,79%. Значення понад 79% у цьому випадку характеризує коефіцієнт структурного покриття вибірки, тобто частку траєкторій або їхніх фрагментів, для яких графова модель відтворює порядок переходів, повтори, повернення та циклічні елементи поведінкової стратегії. Отриманий результат підтверджує придатність підходу для структурного опису нестійких сценаріїв операторської поведінки, але не повинен трактуватися як самостійна психофізіологічна валідація внутрішнього стану оператора.

Таблиця 4.6. Порівняння графа Келі з альтернативними способами подання траєкторій дій

Метод	Оцінка	Перевага	Обмеження	Роль
Простий граф переходів	фактичні переходи між діями	простий і відтворюваний	не описує симетрії та інверсії	базова альтернатива
Марківська модель	імовірності переходів	дає прогноз переходів	потребує статистики	основний імовірнісний підхід
Моделі послідовностей	послідовності дій	добре описують часові патерни	потребують навчальної вибірки	альтернатива для подальшого розвитку
Приховані марковські моделі	приховані стани за спостереженнями	зручний для латентних станів	потребує великих даних	перспективний метод
Граф Келі	структурні зсуви, повтори, інверсії	описує алгебраїчні властивості траєкторії	потребує обґрунтування	допоміжна структурна модель

Разом із тим встановлено, що низка зворотних дій із різною полярністю відносно породжувачів змінює положення поточного вузла графа, яке не може бути відтворено лише фрагментом траєкторії. Це характерно для випадків, коли вектор траєкторії поведінки спрямований вздовж однієї з осей і в певний момент часу змінює напрям на протилежний. З урахуванням аксіом теорії груп маємо висновок, що такі переходи «занулюють» скінченні фрагменти траєкторії. Наприклад, перебуваючи у точці $b^{-1}ab^{-1}$ і переходячи до дії b, втрачаємо два останні фрагменти та отримуємо b^{-1} а замість $b^{-1}ab^{-1}b$.

Ідентифікація такого типу проявів операторів стала можливою завдяки створенню програмного модуля, який у реальному часі визначав швидкість і напрям перекладки керма судна, запобігаючи аварійним перекладанням керма.

На рисунку 4.21 наведено ділянки траєкторії, на яких оператор приймає рішення щодо вибору стратегії, що дає змогу класифікувати ймовірні варіанти подій [82, 50]. Це відіграє важливу роль у визначенні негативного прояву людського фактора в критичних ситуаціях на морському транспорті [233, 342].

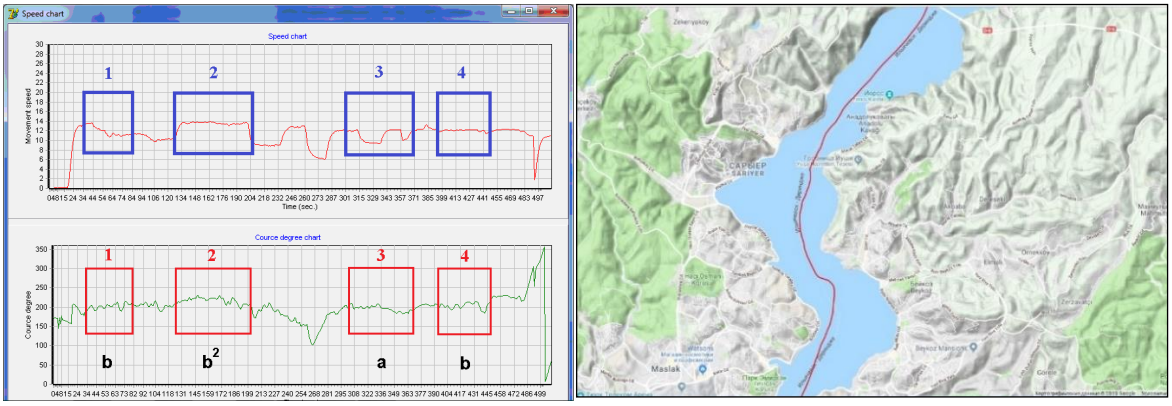


Рисунок 4.21. Аналіз технічних параметрів траєкторії маршруту судна

Однак у процесі експерименту було встановлено, що у початковій моделі не було враховано важливий чинник, а саме перехід від антиципації до дії вздовж породжувача *a* або *b* у зворотному напрямі, характерному для конкретного оператора. Усі фрагменти траєкторії на кшталт $b^{-1}b$ *і* $a^{-1}a$ вказують на прояви антиципації оператора, тоді як *b* b^{-1} *і a* a^{-1} вказують на несвідомі дії, що підтверджують його антиципацію та також породжують полярну множину точок [260].

Інакше кажучи, у ході експерименту було зафіксовано такі випадки як під час аналізу траєкторій, так і під час спостереження та подальшого психологічного діалогу з капітанами. Такі екстремуми формують індивідуальний MNAC як додатковий і доволі нерівномірний шар псевдометрики. Для його відображення доцільно ввести третю вісь.

З огляду на специфіку предметної області слід зазначити, що ці значення не можуть бути однаковими. Логічним є припущення про доцільність визначення результуючого індексу очікувань оператора в кожній локальній точці MNAC. Відносне значення цього індексу в діапазоні 1–10 використовується як нормована міра вираженості екстремуму, тобто відстанню від площини графа до точки (рис. 4.22).

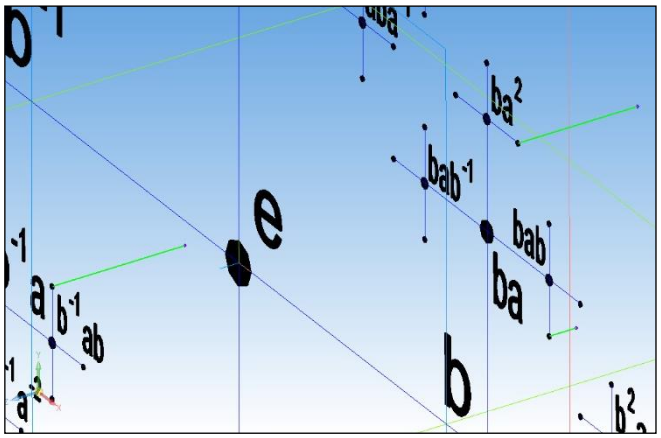


Рисунок 4.22. Формування точок MNAC

Операція композиції переходів у графовій моделі є асоціативною, однак комутативність для цієї структури не припускається, оскільки порядок дій оператора має принципове значення. Виявлені екстремуми MNAC формують додатковий шар структурних обмежень, унаслідок чого траєкторія дій уже не може розглядатися як довільна послідовність переходів, а має аналізуватися з урахуванням порядку, повторів, повернень і локальних інверсій стратегії. Установимо порядок ідентифікації екстремумів антиципації операторів. Уважатимемо, що ці екстремуми було виявлено в процесі спостереження та серії спеціалізованих тестів. Для вимірювання їхнього впливу необхідно вибірково проаналізувати низку показників MNAC із використанням методології соціальних очікувань особистості.

Як інструменти для визначення впливу екстремумів розглянемо два методи: «Рівень очікувань капітана» («LEC») та «Рівень наполягань особистості» («LPC»), для яких у дослідженні встановлено статистично значущий зв’язок, тому їх подано в єдиному просторі ознак.

Склад параметрів психологічного змісту операторів: LCEc – рівень очікувань капітана, LAEc – рівень усвідомлення очікуваних подій, LEAc – рівень очікуваного ставлення до учасників міжособистісної взаємодії та LERc – рівень очікуваних результатів діяльності.

Цю категорію індексів можна подати як геометричну групу, що має результуючий показник LCEc та компоненти LAEc, LEAc, LERc. Отже, можна виділити дві взаємопов’язані геометричні конструкції.

Методика «LPC» складається з чотирьох блоків. До складу блоку «ядро мотиваційної структури особистості» безпосередньо входять: внутрішній мотив, пізнавальний мотив, мотив уникнення, мотив змагання, мотив зміни діяльності та мотив самоповаги. Цю категорію індексів також можна подати у формі геометричної групи як окрему конструкцію моделі поведінки оператора.

Отже, для кращого розуміння та управління одним із компонентів людського фактора – мотивацією операторів, виникає необхідність у розробці відповідних математичних та автоматизованих систем, використання яких спрямовано на підвищення безпеки судноплавства, підвищуючи точність та надійність під час прийняття рішень операторами у складних ситуаціях. Особливий акцент доцільно зробити на розробці математичних моделей, зокрема на застосуванні логіко-метричних просторів та дерев рішень, що дає змогу враховувати велику кількість вхідних змінних і обмежень.

Необхідно забезпечити врахування фактора мотивації оператора при управлінні водним транспортом, що може сприяти автоматизації та оптимізації прийняття рішень [226]. Це також вказує на необхідність розробки нових методів для кращого врахування та прогнозування випадкових процесів в управлінні водним транспортом, що може зменшити ймовірність непередбачуваних аварій і катастроф.

Під час роботи з навігаційними пристроями записи активності операторів зберігаються на сервері [180]. Отримана інформація вказує на характер та налаштування моделі керування судном в ергатичній системі. Пристрої, такі як інформаційні навігаційні системи, радари та системи попередження, синхронізуються. Їх використання не може бути одночасним; тому стає можливим визначення мотивації оператора.

Для досягнення вищезгаданих цілей пропонується реалізувати двохетапний підхід, який складається з двох основних етапів: перший – визначення мотиваційних центрів оператора та їх значущості в межах візуально-геометричної концепції, а другий – аналіз прийняття рішень операторами для визначення їхніх ММС.

Розглянемо етап визначення мотиваційних центрів оператора. Встановимо порядок визначення екстремумів мотивації операторів. Припустимо, що ці екстремуми були виявлені під час спостереження та серії спеціалізованих тестів. Для вимірювання їхнього впливу необхідно проаналізувати ряд індексів ММС вибірково за допомогою методики соціальних очікувань особистості.

Застосування психодіагностичних інструментів для дослідження мотивації особи здійснюється на основі двох методів як інструментів для визначення впливу екстремумів: «LEC», модифікованого, та «LPC», що мають кореляції, досліджені у роботі, і тому повинні бути представлені в метричному просторі [69].

Після визначення екстремумів ММС оберемо відповідні методи щодо них. Кожний метод подається окремим вектором ознак G_1 і G_2. Спільна участь методів буде представлена як декартовий добуток відповідних просторів ознак.

Наступне завдання – визначити вплив екстремумів мотивації, визначаючи важливість події, спроєктованої на новостворену групу прояву ММС. Визначення індексів екстремумів мотивації за вибраними методами передбачає використання комплексного підходу. Враховуючи, що методи мають 10 індексів і вони корелюють між собою різною мірою, що було доведено дослідженням, можна стверджувати, що вони взаємопов’язані. Отже, необхідно знайти узагальнене значення екстремуму мотивації, підсумовуючи дані всіх індексів. Тому було розроблено програмний модуль, що дає змогу синхронізувати дані в одній декартовій системі координат Сі. Наприклад, є вищезгадана траєкторія b^2ab, за якою слідує стратегія b^{-1} – «планування перекладання керма», що видно на паузі в маршруті судна і радикальній зміні курсу (рис. 4.23).

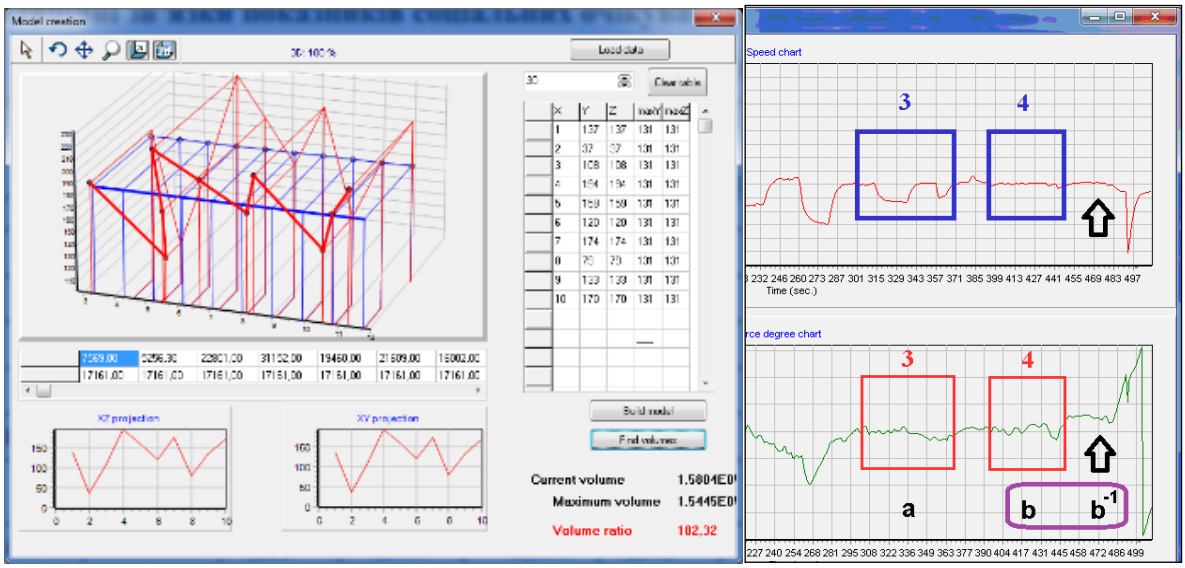


Рисунок 4.23. Визначення впливу точок C_i ММС

Отримавши дані всіх індексів, можна використати цей модуль для визначення узагальненого індексу мотивації оператора. За результатами дослідження точок ММС і порівняння підходів, обираємо індивідуальну модель взаємодії з кожним оператором в рамках дослідження його мотивації.

Отримані розрахункові результати дали змогу встановити кореляцію даних опитування та психологічно-мотиваційних станів операторів (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7. Ментально-мотиваційні стани операторів

Команди	Ментально-мотиваційні стани операторів
2, 8, 7	F3 «Мотивація досягнення» вважається відображенням значних рівнів мотивації до змагання і бажання досягнути успіху без позитивного переоцінювання реальної ситуації. Мотиваційний стан цієї групи операторів багато має спільного з прагненням досягти бажаного результату за будь-яку ціну. F6 «Мотивація приналежності» характеризується бажанням особи бути кращим за інших. Суб'єкт занурюється у постійне виконання складних завдань професійної діяльності, шукаючи соціальної підтримки та заохочення у оточенні, іноді в очах близьких друзів.
1, 3	F2 «Конфронтаційна мотивація» – це схильність до конфронтаційної стратегії подолання проблеми за власною ініціативою, конфронтовуватися, уникаючи пошуку інших альтернатив для подолання проблеми, а також уникаючи відповідальності та позитивного переоцінювання ситуації. F4 «Прагматична мотивація» означає планування вирішення проблеми, яке не супроводжується позитивним переоцінюванням реальної ситуації. Цей мотиваційний стан має бути визначений переважно як пошук схвалення, бажання триматися своєї точки зору і переконань.

Продовження таблиці 4.7.

9, 6	F1 «Его-мотивація» відображає залежність індивідуальних компонентів мотиваційної структури особистості, таких як внутрішній та когнітивний мотив, вольова напруга, оцінка власного потенціалу, очікуваний рівень мобілізації зусиль. Необхідно взяти до уваги значущу негативну кореляцію з конфронтацією та самоконтролем в контексті виконання професійної діяльності. Вплив цього фактора, здається, характеризується внутрішньою та когнітивною активністю в професійній діяльності. F7 «Мотивація до відповідальності» відображає ідею, що всі мотиваційні стани супроводжуються бажанням виконати всі покладені завдання, від найпростіших до найскладніших, належним чином. Такий мотиваційний стан розглядається як стійка схильність до порядку й дисципліни.
4, 5, 10, 11	F5 «Мотивація до уникнення» включає змінні, психологічний зміст яких спрямований на відображення бажання уникати відповідальності, ініціативи тощо. Є статистично значущий негативний зв’язок з оцінкою рівня досягнутих результатів. Такі особи мають схильність повністю уникати ситуацій, у яких їм потрібно мати справу з чимось.

Таким чином, психологічні та формально-аналітичні підходи, представлені в підрозділі, можуть бути використані для класифікації ментально-мотиваційних станів операторів у формі геометрично визначеного простору станів [235, 167].

4.5. Метод непрямої ідентифікації функціонального виснаження оператора за траєкторіями дій та часовими параметрами взаємодії із засобами навігаційного забезпечення

Однією з найбільш суттєвих причин негативного впливу людського фактора на безпеку мореплавства є втома оператора. Для систем навігаційного забезпечення це має принципове значення, оскільки саме втома знижує стійкість операторського контуру, погіршує точність сприйняття інформаційного поля, уповільнює прийняття рішень і підвищує ймовірність помилок під час виконання навігаційних завдань. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених режимам праці та відпочинку під час несення вахти, робіт, орієнтованих на безпосередню ідентифікацію втоми в реальному часі за поведінковими та часовими параметрами взаємодії з навігаційними засобами, залишається недостатньо [99]. Водночас результати психологічних і медичних досліджень свідчать про неоднорідність проявів втоми у часі, що суттєво ускладнює побудову надійної діагностичної моделі [124].

У цьому підрозділі розглядається альтернативний підхід до непрямого виявлення ознак функціонального виснаження оператора, які проявляються у процесі виконання складних навігаційних завдань на ходовому містку. У межах експериментального аналізу особливу увагу зосереджено на поставі оператора під час роботи з навігаційними приладами, а також на швидкості реакції під час виконання елементарних дій. Застосування сенсорного модуля контролю постави оператора, умовно позначеного в роботі як «сенсорний модуль постурального моніторингу оператора», дало змогу істотно спростити визначення просторового положення оператора у режимі реального часу, а автоматизований аналіз мікрореакцій забезпечив можливість диференційованого оцінювання постуральних і часових ознак, які можуть бути пов'язані з функціональним виснаженням [100].

Для формального розмежування прямої діагностики та непрямої ідентифікації введемо зовнішній експертно-заданий стан: $F^*(t) \in \{0,1\}$, де $F^*(t) = 1$ відповідає наявності втоми за незалежним контрольним критерієм, а $F^*(t) = 0$ – її відсутності. Таким контрольним критерієм може бути стандартизована шкала втоми, експертна розмітка відео, тест швидкості реакції, PVT-тест, показники HRV, EEG/EOG, eye-tracking або інший зовнішній психофізіологічний маркер.

У межах цього дослідження основним об'єктом моделювання є не $F^*(t)$ як прямий еталон, а розрахунковий індикатор непрямих ознак:

$$I_F(t) = \omega_1 C_{post}(t) + \omega_2 C_{react}(t) + \omega_3 C_{mov}(t) + \omega_4 C_{phys}(t), \tag{4.85}$$

$$\sum_{i=1}^{4} \omega_i = 1,\ \omega_i \geq 0, \tag{4.86}$$

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

Модельна оцінка задається правилом:

$$\hat{F}(t) = \begin{cases} 0, & I_F(t) < \theta_F, \\ 1, & I_F(t) \geq \theta_F. \end{cases} \tag{4.87}$$

За відсутності зовнішнього еталона $F^*(t)$ результат $\hat{F}(t)$ має

трактуватися не як остаточна діагностика втоми, а як виявлення сукупності непрямих ознак, потенційно пов'язаних із функціональним виснаженням оператора.

У цьому контексті сенсорний модуль постурального моніторингу розглядається як динамічна система. У межах цього дослідження сенсорний модуль постурального моніторингу не розглядається як повна динамічна система зі станом, входом, виходом і оператором переходу. Його роль обмежується формуванням набору вимірюваних постуральних ознак, що використовуються для непрямої ідентифікації функціонального виснаження.

$$X_E(t) = \left(l(t), \Delta l(t), v_l(t), a_l(t), p_E(t)\right), \tag{4.88}$$

де $l(t)$ – кутове положення або викривлення постави; $\Delta l(t) = l(t) - l_0$ – відхилення від експертно-заданого положення; $v_l(t) = \dfrac{dl(t)}{dt}$ – швидкість зміни положення; $a_l(t) = \dfrac{d^2 l(t)}{dt^2}$ – прискорення зміни положення.

$p_E(t)$ – ідентифікована зона або положення оператора відносно навігаційного обладнання. Постуральна ознака втоми визначається як:

$$C_{post}(t) = clip\left(\frac{\left|\Delta l(t)\right| - \theta_l^{(1)}}{\theta_l^{(2)} - \theta_l^{(1)}}\right),\ 0 < \theta_l^{(1)} < \theta_l^{(2)}. \tag{4.89}$$

Залежно від положення оператора автоматизована система дає змогу визначити, з яким саме навігаційним приладом він працює (рис. 4.24).

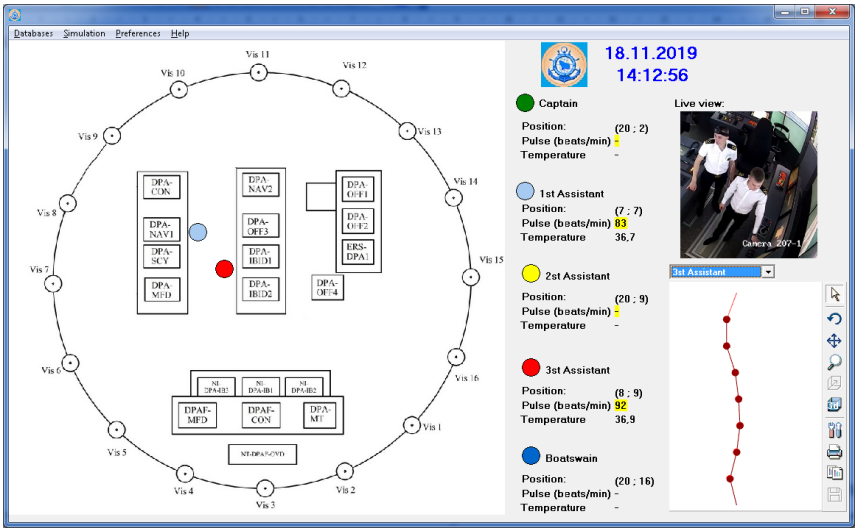


Рисунок 4.24. Інформаційна система стану операторів

Тому в низці подібних ситуацій із достатнім ступенем упевненості можна стверджувати, що короткочасне відхилення постави може бути фізіологічно зумовленим, але лише на короткий проміжок часу, оскільки панель приладів розташована нижче рівня прямого погляду. Водночас відстежуються чинники, що безпосередньо впливають на психоемоційний стан оператора, зокрема пульс і температура тіла у сукупності зі швидкістю виконання маніпуляцій із джойстиками, кнопками та сенсорними панелями ECDIS, ARPA, GPS тощо [197, 295, 299, 313].

Згідно з положеннями теорії планування керувальних дій, складній усвідомленій дії оператора передує план, який являє собою послідовність етапів керувального впливу на об'єкти керування судном у певний момент часу. Множина допустимих керувальних впливів з боку оператора подається у вигляді: $u = \{u \in E_n \,|\, |u_i| \le u_i', i = 1,...,n\}$ де $u(t) \in V$.

Визначивши множину допустимих керувальних впливів з боку оператора у вигляді $X \times Y,\ x \in X$, для якої $Y(x) \subseteq Y \subset E_m$ буде прийнятною моделлю $q(x) = \max\limits_{y \in Y(x)} f^0(x, y) \to \min\limits_{x \in X}$, де y – вертикальна вісь положення постави, а x – горизонтальна.

Припустимо, що оператор виконує маневр і одночасно спостерігає за навігаційними приладами та елементами керування. При цьому він сам визначає траєкторію і послідовність дій як з огляду на власний досвід, так і з урахуванням усталеної моделі поведінки. Таким чином, формується план дій, який у конкретній ситуації виявляється найбільш виправданим і результативним. Існують підходи, що дозволяють ідентифікувати траєкторії дій і відстежувати індивідуальні послідовності дій оператора. Однак при цьому постає проблема порівняння та класифікації таких траєкторій, а також визначення їх результативності на ранніх етапах виконання маневру. У цьому підрозділі зазначається, що основним чинником, який дає змогу ідентифікувати траєкторії, що призводять до ризику, є час взаємодії з навігаційними приладами або елементами керування [104].

Нехай Δt_{sw} – час перемикання уваги між двома елементами траєкторії або джерелами інформації: $\Delta t_{sw} = t_{k+1}^{fix} - t_k^{fix}$.

Емпіричний поріг перемикання задається як квантиль розподілу:

$$\theta_{sw} = Q_{0.95}\left(\Delta t_{sw}\right). \tag{4.90}$$

Ознака затримки перемикання:

$$C_{sw}\left(t\right) = \begin{cases} 0, \ \Delta t_{sw} \le \theta_{sw}, \\ 1, \ \Delta t_{sw} > \theta_{sw}. \end{cases} \tag{4.91}$$

У типовому режимі θ_{sw} може наближатися до 1 с, однак у моделі він розглядається як емпірично оцінюваний поріг, а не як універсальна стала.

Експерименти, проведені на базі Transas Navigational Simulator NTPRO 5000 Херсонської державної морської академії із залученням досвідчених моряків, дали змогу зробити висновок, що моделі поведінки операторів відтворюються і зберігають відносну сталість і відносно зрідка трансформуються у принципово нові форми незалежно від локації та погодних умов. Водночас фактор втоми вносить істотні зміни в поведінку оператора та відрізняється від інших чинників інтенсивністю впливу на кінцевий результат [105].

Для формального опису подій і траєкторій дій між об’єктами керування судном та джерелами навігаційних даних доцільно застосувати алгебру подій і логіко-геометричні підходи, здатні описувати поведінку оператора у складних умовах навігаційного забезпечення [298]. У межах експериментальних даних проаналізовано LOG-файли із сервера симулятора для сценарію проходження протоки Ла-Манш (English Channel). Траєкторія дій характеризувалася дев’ятьма етапами, кожен з яких визначався часом фіксації уваги або витратами часу на керувальні маніпуляції: керування кермом, машинним телеграфом, підрулюючими пристроями, робота з навігаційними сигналами тощо.

Для визначення моделі поведінки окремого оператора необхідно мати щонайменше 5–9 повторних траєкторій. У ході експерименту було проаналізовано 11 траєкторій за участю одного й того самого оператора та з виконанням типового маневру в різних локаціях. Для більшої наочності

розглянуто сценарій виконання швартовних операцій. Часові діапазони роботи з об’єктами траєкторії мають 2–3 рівні уповільнення, що свідчить про наявність невипадкового супутнього чинника, який впливає на часові показники виконання маневру.

Для наочності надаємо таку траєкторію у вигляді графа та описуємо особливості її побудови. Вершини графа s_i характеризують інтегральну готовність до виконання відповідного етапу маневру і залежать не від безпосередньо встановленої втоми, а від сукупності непрямих постуральних, часових і поведінкових ознак, які можуть відображати функціональне виснаження оператора, а також від індивідуального порога сприйняття навігаційної небезпеки. У цьому разі вводяться такі позначення: α – реакція швидкого переходу до наступного елемента траєкторії; β – постуральний індикатор можливого функціонального виснаження, що визначається за відхиленням постави або викривленням екзохребта; γ – часово-поведінковий індикатор можливого функціонального виснаження, що визначається за уповільненням реакції або повторними зверненнями до елементів траєкторії.

Переходи між етапами траєкторії s_i можуть бути як односпрямованими у разі реакції α, так і зворотними за наявності показників β або γ. У ході експерименту були визначені ситуації, коли оператор повертається до елемента траєкторії через нестачу сприйнятої інформації або зміну стратегії управління. Така поведінка оператора є характерною за умов неповністю сформованого плану дій на найближчий відрізок часу. Саме тому метою дослідження є автоматизована ідентифікація подібних явищ, що дає змогу визначити вплив людського фактора за непрямими ознаками [206].

Для детальнішого аналізу введемо рівні етапів, що характеризують взаємодію операторів із навігаційними приладами та об’єктами навігаційної обстановки. Ці рівні відрізняються за складністю – від найменш складного l_1 до найскладнішого l_4 (рис. 4.25): l_1 – візуальне сприйняття ситуації; l_2 – аналіз поточних даних навігаційних приладів; l_3 – виконання маневрів кермом, машинним телеграфом, підрулювальними пристроями, навігаційними

сигналами тощо; l_4 – розходження з цілями, швартування, розрахунок складних маневрів.

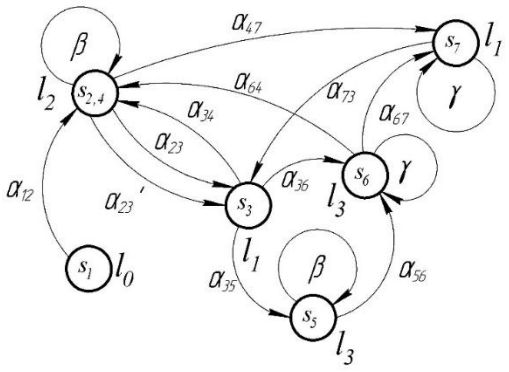


Рисунок 4.25. Рівні складності етапів траєкторії у класичному графі

Рівні складності задаються як ординальна шкала:

$$\mathcal{L} = \{l_1, l_2, l_3, l_4\}. \tag{4.92}$$

$$l_1 \prec l_2 \prec l_3 \prec l_4. \tag{4.93}$$

Для етапу траєкторії s_i: $L(s_i) \in \mathcal{L}$. Допускається лише порядкове порівняння: $L(s_i) \prec L(s_i)$, $L(s_i) \succ L(s_i)$. Метрична різниця між рівнями не використовується: $d(l_i, l_j)$ не задається.

Координатне подання графа на площині обмежується дискретною віссю l_i та неперервною віссю t_i, що визначає часові проміжки Δt між етапами траєкторії s_i. Це може бути описано матрицею прямих дій:

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} \varnothing & \alpha_{12} & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \varnothing \\ \varnothing & \beta & \alpha_{23} & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \varnothing \\ \varnothing & \varnothing & \varnothing & \alpha_{34} & \alpha_{45} & \alpha_{36} & \varnothing \\ \varnothing & \varnothing & \alpha_{23}' & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \alpha_{47} \\ \varnothing & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \beta \vee \gamma & \alpha_{56} & \varnothing \\ \varnothing & \varnothing & \varnothing & \alpha_{64} & \varnothing & \gamma & \alpha_{67} \\ \varnothing & \varnothing & \alpha_{73} & \varnothing & \varnothing & \varnothing & \gamma \end{vmatrix}. \tag{4.94}$$

Побудова дій у траєкторії внаслідок введення β і γ, а також обов’язкові часові показники не розв’язують у повному обсязі зазначену проблему. Система рівнянь (4.94) також не повною мірою відображає траєкторію (рис. 4.26):

$$
\begin{aligned}
X_1 &= X_1 S_{11} \vee X_2 S_{21} \vee \ldots \vee X_n S_{n1} \vee R_1, \\
X_2 &= X_1 S_{12} \vee X_2 S_{22} \vee \ldots \vee X_n S_{n2} \vee R_2, \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\
X_n &= X_1 S_{1n} \vee X_2 S_{2n} \vee \ldots \vee X_n S_{nn} \vee R_n.
\end{aligned}
\tag{4.95}
$$

де X – подія з прив'язкою до елемента траєкторії дій, S_{ij} – позначення переходу від події X_i до X_j.

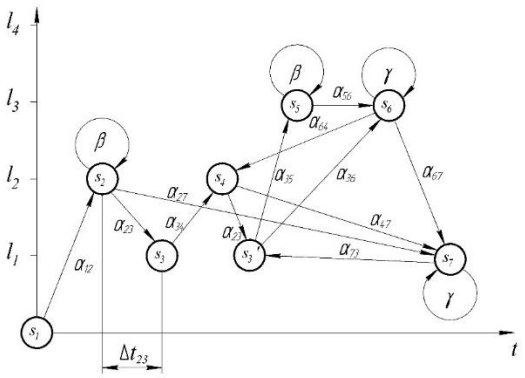
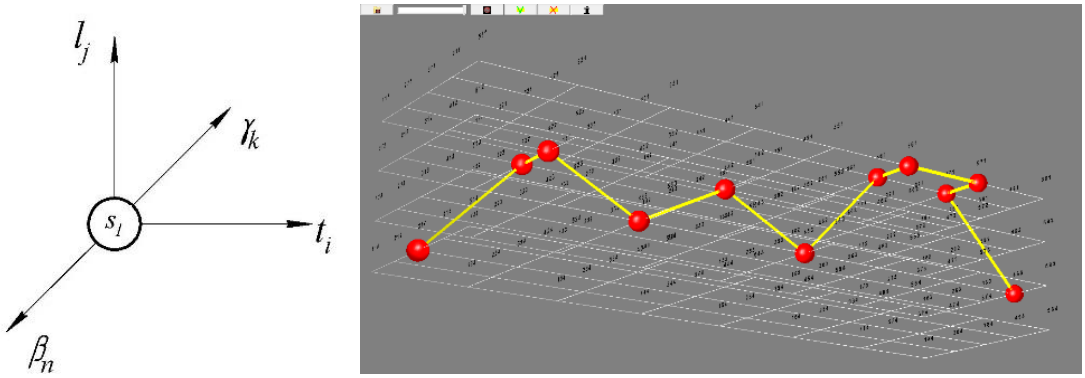


Рисунок 4.26. Розгорнутий у часі граф на площині. Апроксимація траєкторії елементів у просторі станів

Таким чином, у ході дослідження було прийнято, що використання класичного графа є недоцільним, оскільки кожний елемент траєкторії вже не є тим самим, яким він був у момент t_{i-1}. Це зумовлено зміною стану втоми оператора та витрачених зусиль, тому доцільно застосовувати інтерпретацію розгорнутого у часі графа. Такий підхід є особливо виправданим у ситуаціях, коли передбачається наявність часових інтервалів для виконання дій.

У звичній інтерпретації неможливо коректно вказати часову мітку, якщо до елемента траєкторії виконується зворотне звернення. Проблемною залишається і ситуація, коли цикл містить одну або дві повторювані події, черговість і часовий діапазон впливу яких виражені неявно. У цьому випадку доцільно застосувати третю вісь, яка дає змогу з достатньою точністю визначити всі часові інтервали відносно активних елементів траєкторії. Тоді графічна інтерпретація описується тривісною геометричною системою (рис. 4.27).



а *б*

Рисунок 4.27. Тривісна геометрична система для побудови графа

Очевидно, що опис багатоступеневих траєкторій на площині істотно ускладнений графом на площині без спеціально розроблених програмних засобів візуалізації. У зв'язку з цим було створено програмний засіб візуалізації траєкторій, який відповідає зазначеним особливостям урахування як часових показників, так і показників втоми [290].

Як один із базових способів розв'язання задачі запропоновано автоматизовану геометричну апроксимацію траєкторії, яка дає змогу відображати швидкість переходу між її елементами у вигляді товщини ребра, а час – у вигляді діаметра вузла (рис. 4.28).

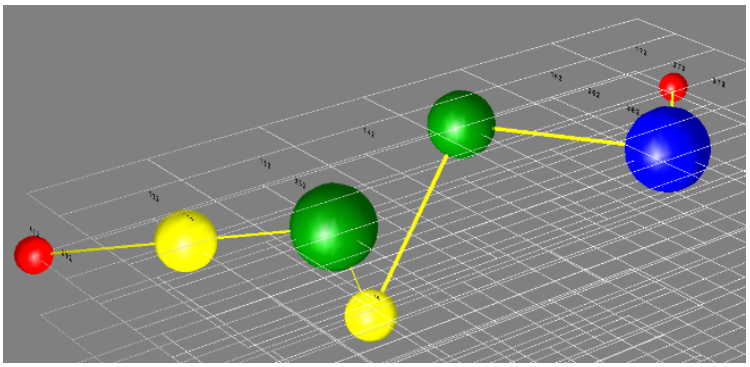


Рисунок 4.28. Геометрична апроксимація траєкторії дій оператора

У ході експериментів у низці випадків, пов'язаних із ускладненням навігаційної обстановки внаслідок негативного впливу відповідних чинників, виявлено часті повернення до попередніх елементів траєкторії, що свідчать про втрату впевненості в діях оператора. При цьому у разі впевненого сприйняття навігаційної ситуації, коли оператор із високим ступенем

достовірності сприймає інформаційні параметри φ у вузлі x, маємо $B(x, \varphi)$. Тоді в момент часу t_{x+1} формування зв'язків у контексті вузла x відбувається на основі таких принципів.

Для однозначного тлумачення подальших логіко-формальних залежностей введемо систему позначень. Нехай $\mathcal{M} = (V, R, \nu)$ – модель станів операторської діяльності, де V – множина інформаційно-поведінкових вузлів траєкторії; $R \subseteq V \times V$ – відношення допустимих переходів між вузлами; ν – функція оцінювання істинності висловлювань у відповідних вузлах. Через $x \in V$ позначено поточний вузол траєкторії, а через $\varphi, \psi \in \mathcal{L}$ – висловлювання щодо навігаційної ситуації, інформаційних параметрів, цілей або дій оператора.

У формулах (4.99)–(4.110) використовуються такі предикати й оператори:

$B(x, \varphi)$ – предикат переконання або впевненого сприйняття, який є істинним, якщо у вузлі x оператор сприймає висловлювання φ як достовірне;

$K(x, \varphi)$ – предикат знання, який є істинним, якщо у вузлі x інформацію φ не лише сприйнято оператором, а й підтверджено сукупністю ситуаційних та емпіричних передумов;

$L_S(x, \varphi)$ – предикат ситуаційної узгодженості, який характеризує відповідність висловлювання φ поточному контексту навігаційної ситуації у вузлі x;

$L_E(x, \varphi)$ – предикат емпіричного підтвердження, який характеризує наявність інструментальних, візуальних або інших спостережуваних даних, що підтверджують висловлювання φ;

$G(x, \varphi)$ – предикат сформованої цілі або наміру оператора щодо досягнення стану, визначеного висловлюванням φ;

$I(x, \varphi)$ – предикат інформаційної доступності, який означає, що інформація φ доступна оператору або включена до його інформаційної моделі у вузлі x;

$P(x,\xi_1,\ldots,\xi_m)$ – оператор формування переваг, який подає структуру вибору оператора у вузлі x щодо інформаційних, цільових або діяльнісних альтернатив $\xi_1,\ldots,\xi_m,\ m>1$;

$Do(x,\alpha)$ – предикат виконання дії, який означає, що у вузлі x оператор обирає або реалізує дію $\alpha \in \Theta_A$, а Θ_A – множина допустимих керувальних дій;

$Af(\chi)$ – предикат актуалізації, який означає, що умову, дію або перехід χ фактично реалізовано на поточний крок. Відповідно, $\neg Af(\chi)$ означає відсутність актуалізації χ. У записі $Af\big(p(u), p(u+1)=\alpha\big)$ цей предикат визначає реалізацію переходу від елемента $p(u)$ до елемента $p(u+1)$ унаслідок виконання дії α.

Символи $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\Rightarrow$, $\Leftrightarrow$ позначають відповідно заперечення, кон'юнкцію, диз'юнкцію, імплікацію та логічну еквівалентність; символ $\perp$ відповідає хибному або суперечливому стану; символ $\top$ позначає істинний стан моделі за всіх допустимих станів.

У межах модально-темпоральної інтерпретації застосовуються такі оператори: $\Box\chi$ – необхідність виконання умови χ, тобто її істинність у всіх допустимих станах, досяжних із поточного вузла; $\Diamond\chi$ – можливість або досяжність умови χ, тобто її істинність принаймні в одному допустимому стані; $\bigcirc\chi$ – істинність умови χ у наступному інформаційно-поведінковому стані траєкторії.

Формально подамо у вигляді виразів:

$$\mathcal{M}, x \vDash \Box\chi \Leftrightarrow \forall y \in V : \big((x,y) \in R \Rightarrow \mathcal{M}, y \vDash \chi\big). \qquad (4.96)$$

Це означає, що висловлювання χ є необхідним у вузлі x, якщо воно істинне в кожному вузлі y, до якого існує допустимий перехід із x.

$$\mathcal{M}, x \vDash \Diamond\chi \Leftrightarrow \exists y \in V : \big((x,y) \in R \wedge \mathcal{M}, y \vDash \chi\big). \qquad (4.97)$$

Це означає, що висловлювання χ є можливим у вузлі x, якщо існує хоча б один допустимий вузол y, досяжний із x, у якому χ є істинним.

$$\mathcal{M}, \pi, t \vDash \bigcirc\chi \Leftrightarrow \mathcal{M}, \pi, t+1 \vDash \chi. \qquad (4.98)$$

Це означає, що висловлювання $\bigcirc\chi$ є істинним у момент *t*, якщо висловлювання χ є істинним у наступному стані траєкторії, тобто в момент *t*+1.

Тоді повний запис траєкторії є: $\pi = (x_t, x_{t+1}, \ldots),\ (x_k, x_{k+1}) \in R,\ k = t, t+1, \ldots$

У формулах, де застосовуються оператори *U* та *S*, прийнято:

$\chi_1 U \chi_2$ – умова χ_1 виконується доти, доки не настане стан χ_2;

$\chi_1 S \chi_2$ – умова χ_1 виконується від моменту попереднього настання стану χ_2.

У введених позначеннях формування переконань, знань, цілей і послідовностей дій оператора описується залежностями (4.99)–(4.110).

$$L_S(x,\varphi) \wedge \bigcirc B(x,\neg\varphi) \Rightarrow B(x,\varphi)$$
$$L_S(x,\varphi) \wedge \neg\bigcirc B(x,\neg\varphi) \Rightarrow B(x,\varphi)$$
$$\neg L_S(x,\varphi) \wedge \neg\bigcirc\big(B(x,\neg\varphi) \Rightarrow B(x,\varphi)\big) \Rightarrow B(x,\neg\varphi) \qquad (4.99)$$

При цьому $K(x,\varphi)$ свідчить про те, що оператор знає про інформацію φ у вузлі *x*, тобто $\bigcirc B(x,\neg\varphi) \equiv \bot$, що також визначає низку правил формування знань:

$$L_S(x,\varphi) \wedge B(x,\varphi) \wedge L_E(x,\varphi) \Rightarrow K(x,\varphi),$$
$$\neg L_S(x,\neg\varphi) \wedge B(x,\neg\varphi) \wedge L_E(x,\neg\varphi) \Rightarrow K(x,\neg\varphi), \qquad (4.100)$$
$$L_S(x,\neg\varphi) \wedge \neg B(x,\neg\varphi) \wedge \neg L_E(x,\neg\varphi) \Rightarrow \neg K(x,\neg\varphi)$$

Тут $X \in V$ – цільовий вузол завершення траєкторії; $\Phi, \Psi \subseteq L$ – відповідно множини умов можливого та необхідного досягнення цільового стану; Ψ' – уточнена множина необхідних умов для траєкторії без повторних звернень до попередніх елементів. Запис $G(X, \Phi, \Psi)$ є агрегованою формою предиката цілі для повної траєкторії.

Таким чином можна стверджувати, що кінцевою метою *X* є виконання оператором послідовності дій - елементів траєкторії, при цьому існує низка умов Ψ, що визначають $\Box X$, і умов Φ, що визначають $\Diamond X$. Проходження всього запланованого маршруту виражатиметься наміром $\Box G(X,\Phi,\Psi)$ таким, що:

$$\begin{gathered}\Box \mathrm{G}(\mathrm{X},\Phi,\Psi) \equiv B(X,\neg\Phi) \wedge G(X,\Diamond\Psi) \wedge \\ \wedge K\left(X,\left[\left(B(X,\Phi) \vee B(X,\neg\Box\Phi) \vee B(X,\neg\Psi)\right)\right]\right)\end{gathered} \tag{4.101}$$

Своєю чергою, успішне проходження траєкторії без повторних звернень до її елементів може бути описано:

$$\begin{gathered}\Box \mathrm{G}(\mathrm{X},\Phi,\Psi)' \equiv B(X,\neg\Phi) \wedge G(X,\Diamond\Psi) \wedge \\ \wedge K\left(X,\left[\left(B(X,\Phi) \vee B(X,\neg\Box\Phi) \vee B(X,\neg\Psi)\right)\mathcal{U}\left(G(X,\Diamond\Psi)\right)\right]\right)\end{gathered} \tag{4.102}$$

У низці ситуацій довгу траєкторію доцільно поділити на однорідні фрагменти, що характеризуються високою активністю прийнятих рішень, кожен із яких відокремлюється часовим інтервалом $t_{(\Delta+m)}$, де m – кількість відрізків глобальної траєкторії. При цьому приймемо, що якщо первинні фрагменти траєкторії подолано успішно, то формуються переконання оператора, описані умовами в майбутньому $\bigcirc G(x,\varphi)$:

$$\bigcirc G(x,\varphi) \Leftrightarrow I(x,\varphi) \wedge K([Do(x,\alpha)],\varphi) \wedge \Box Do(x,\alpha_f), \qquad \alpha,\alpha_f \in \Theta_A, \tag{4.103}$$

а також на конкретному фрагменті траєкторії.

Квадратні дужки $\left[Do(x,\alpha)\right]$ позначають контекстний стан, сформований унаслідок виконання дії α у вузлі x.

$$\begin{gathered}G(x,\varphi)_{t_{(\Delta+m)}} \Leftrightarrow I(x,\varphi), \\ G(x,\varphi\wedge\psi) \Rightarrow G(x,\varphi) \wedge G(x,\psi),\end{gathered} \tag{4.104}$$

що дає змогу підвищити рівень сприйняття інформації в тих випадках, коли фрагменти траєкторії характеризуються однаковим набором дій з боку оператора у вигляді переконань:

$$B_{t_{\Delta+m}}(x,\Box(\varphi\wedge\psi)) \wedge I_{t_{\Delta+m}}(x,\varphi) \wedge I_{t_{\Delta+m}}(x,\psi) \Rightarrow I_{t_{\Delta+m+1}}(x,\varphi\wedge\psi). \tag{4.105}$$

Тоді вироблений план дій на момент $t_{(\Delta+m)}$, що відображається в інформаційній моделі поведінки $P(x,\varphi)$, де інформація про виконання елементів траєкторії $I(x,\varphi)$ подана у вигляді:

$$I(x,\varphi) \equiv \Box G\left(x,\exists e\left[B\left(x,\exists e'\left(\text{happening}(x,e';\varphi)\right)\right) \wedge G\left(x,\neg\text{happening}(x,e,\varphi)\right)\right];e;\varphi\right)$$

На основі сприйнятої інформації формується структура переваг оператора, подана оператором P, аргументи якого належать множині інформаційних, цільових і діяльнісних альтернатив:

$$\xi_j \in \{B(x,\varphi), I(x,\varphi), G(x,\varphi), \alpha\}, \quad j=1,\ldots,m, \quad \varphi \in \mathcal{L}, \quad \alpha \in \Theta_A,$$

$$\begin{aligned}
&P(x,I(x,\varphi),I(x,\psi)) \Rightarrow I(x,\varphi) \wedge I(x,\psi),\\
&P(x,G(x,\varphi),G(x,\psi)) \Rightarrow G(x,\varphi) \wedge G(x,\psi),\\
&P(x,G(x,\varphi),G(x,\psi)) \Rightarrow P(x,I(x,\varphi),I(x,\psi)) \wedge G(x,\varphi) \wedge G(x,\psi),\\
&P(x,G(x,\varphi),I(x,\psi)) \Rightarrow P(x,I(x,\varphi),I(x,\psi)) \wedge G(x,\varphi),\\
&I(x,\varphi) \wedge B(x,\Box\varphi) \wedge \neg\exists \psi \in \mathcal{L}\, P(x,I(x,\psi),I(x,\varphi)) \Rightarrow G(x,\varphi).
\end{aligned} \tag{4.106}$$

Подальше уточнення структури переваг P здійснюється шляхом послідовного оновлення її інформаційних і цільових аргументів.

Водночас слід урахувати, що чинники, які впливають на виконання фрагмента траєкторії дій, впливають і на виконання елемента в майбутньому – α_i, де α_1 є найбільш результативним у поданні оператора, тоді:

$$\begin{aligned}
&P(x,\alpha,\alpha_1) \equiv G\left(x,\left[Do(x,\alpha)\right]\right) \wedge B\left(x,\left[\alpha_1 \succ \alpha\right]\right) \wedge B\left(x,\ \alpha_2 \succ \alpha\ \right) \wedge \ldots\\
&\ldots \wedge B\left(x,\ \alpha_n \succ \alpha\ \right) \wedge B\left(x, \bigwedge_{1\le i<j\le n} (\alpha_i \neq \alpha_j)\right) \Rightarrow G\left(x,\left[Do(x,\alpha)\right]\right) \wedge \ldots\\
&\ldots \wedge \left(\neg G\left(x,\left[Do(x,\alpha_2)\right]\right) \wedge \ldots \wedge \left(\neg G\left(x,\left[Do(x,\alpha_n)\right]\right)\right)\right).
\end{aligned} \tag{4.107}$$

У цьому сенсі початкова інформація φ передбачає виконання ψ за знань K і визначає:

$P(x,\alpha,\varphi) \equiv G\left(x,\left[Do(x,\alpha)\right]\right) \wedge K\left(\left[Do(x,\alpha)\right],\varphi\right)$, таке, що:

$$G(x,\varphi \mathcal{U} \psi) \equiv P\left(x,G(\psi),I(\varphi)\right) \wedge \neg\exists\varphi\left[P\left(x,G(\psi),G(\varphi)\right) \wedge P\left(x,G(\varphi),I(\varphi)\right)\right]$$

де $\mathcal{U}$ формує розвиток траєкторії в майбутньому.

У цьому випадку φ як передумова до виконання наступного фрагмента траєкторії визначається залежностями такими, що:

$$\begin{aligned}
&G(x,\varphi S \top) \equiv \neg\exists \psi \in \mathcal{L}\, P(x,G(x,\psi),I(x,\varphi)),\\
&G\left(x,\varphi S(\psi \wedge \varphi)\right) \equiv G(x,\varphi U \psi) \wedge G(x,\psi S \varphi),\\
&G(x,\varphi) \equiv I(x,\varphi) \wedge \forall \psi \in \mathcal{L}\left[P(x,\varphi S \psi) \Rightarrow B\left(x,\Box(\varphi \wedge \psi)\right)\right],
\end{aligned} \tag{4.108}$$

що приводить до усталених переконань щодо результативного виконання фрагмента траєкторії.

У найбільш складних позаштатних ситуаціях ролі та стратегії на ходовому містку можуть змінюватися, що кардинально впливає на формування траєкторії та потребує витрат зусиль *I*:

$$\begin{aligned}
&G(x,\varphi)\wedge\neg Af\left(G(x,\varphi)\right)\Rightarrow\bigcirc G(x,\varphi),\\
&G(x,\varphi)\wedge\neg Af\left(G(x,\varphi)\right)\Rightarrow\neg\Psi(\psi)\left[P\left(x,I(\psi),I(\varphi)\right)\wedge Af\left(\Psi(\varphi)\right)\right]\Rightarrow\\
&\Rightarrow\bigcirc G(x,\varphi)\\
&G(x,\varphi)\wedge\neg Af\left(G(x,\varphi)\right)\wedge\\
&\wedge\forall\psi\left[P\left(x,I(\psi),I(\varphi)\right)\Rightarrow\neg Af\left(I(x,\psi)\right)\wedge B\left(x,\Box(\varphi\wedge\psi)\right)\right]\Rightarrow\bigcirc G(x,\varphi)
\end{aligned}\qquad (4.109)$$

де $\Psi(\varphi),\ \varphi\subset\Psi$ – формування індивідуальних рівнів можливого сприйняття та реакції на навігаційні умови з боку оператора.

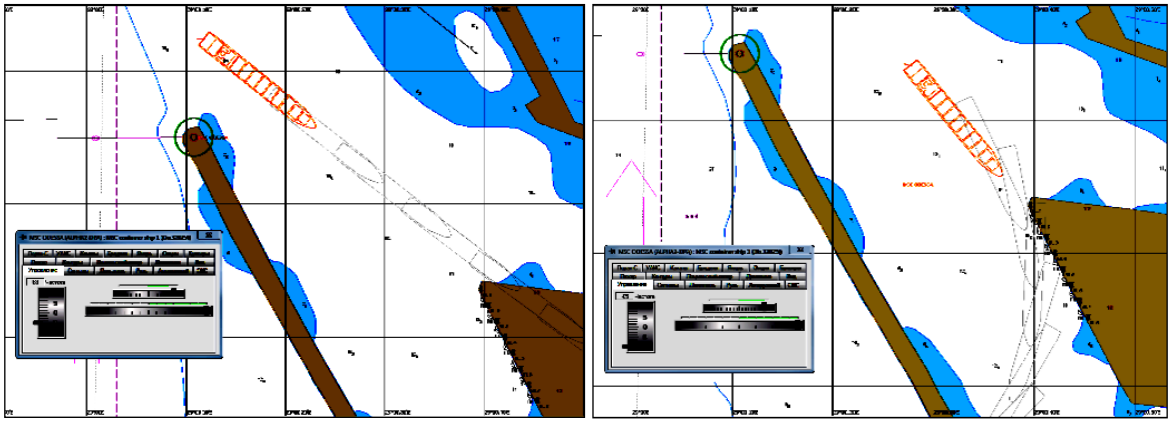
З урахуванням специфіки виконання швартових операцій найбільш доцільним є використання підходу, що передбачає детермінований процес.

Тоді швартування судна *s* описується парою $(w,t\,|\,w\in W,t\in T)$, де $w=\left\langle\Theta_A^w,\Theta_O^w,\Theta_F^w,R_O^w\right\rangle$. При цьому варіації траєкторії швартових операцій описуються множиною $S_w=\left\{(w,t)\,|\,t\in T\right\}$.

Загальна множина швартових ситуацій визначається як $S=\bigcup_{w\in W}S_w$, де $s\in S$, а час описується послідовністю дій у межах траєкторії $(t_0,...,t_k),\forall u\in$ $\in\{0,...,k-1\}$, $(t_u\,|\,u\in N)$, $(t_u,t_{u+1})\in R_w$, що є характерним для початкових етапів. При цьому формується план дій на момент t_{u+1}.

Як правило, первинний план розвитку траєкторії дій сформовано, однак не враховано всі можливі чинники, що формують її Δ_p. Саме ці чинники визначають подальший розвиток траєкторії, причому спочатку формується інформація-план її виконання $\beta_1,\beta_2,...,\beta_n$, фрагментована як $\Delta_{\beta(t_u)}$. Ідентифікатор ситуації $\delta\subseteq S\times S$ залежить від обмежень таких, що $\left((w,t),(w',t')\right)\in\delta$, і передбачає $(s,s')\in\delta$ як частину класоутворювальної

множини Δ_δ. Таким чином результат варіативного формування траєкторії може бути істотно різним (рис. 4.29).



а *б*

Рисунок 4.29. Момент прийняття рішень оператором

На рисунку 4.29 видно зміни стратегії виконання маневру $\beta_1 \vee \beta_2$ залежно від обмежень $w', t' \in \delta$, коли оператор обирає напрям і швидкість руху судна для запобігання навалу.

Опишемо план дій оператора β щодо утримання судна на місці під час подачі швартових кінців та підтягування до причалу за допомогою двигунів, що задається предикатом $\circledast(\beta, p, u, v)$, де p – траєкторія до завершення швартування, а $[u, v] \in T$ – часові інтервали, відведені на виконання маневру, які не повинні перевищувати однієї години через імовірний перегрів підрулювального пристрою. Тоді траєкторія виконання задачі швартування описуватиметься такими залежностями:

$$
\begin{aligned}
&\circledast(\alpha, p, u, v) \Leftrightarrow (v = u+1) \wedge Af\left(p(u), p(u+1) = \alpha\right),\ \alpha \in \Theta_A;\\
&\circledast(\beta; \beta', p, u, v) \Leftrightarrow \left(\exists n \in [u, \ldots, v]\right) \wedge \left(\circledast(\beta, p, u, v)\right) \wedge \left(\circledast(\beta', p, u, v)\right);\\
&\circledast(\beta \mid \beta', p, u, v) \Leftrightarrow \left(\circledast(\beta, p, u, v)\right) \wedge \left(\circledast(\beta', p, u, v)\right);\\
&\circledast(\beta \parallel \beta', p, u, v) \Leftrightarrow \left(\circledast(\beta, p, u, v)\right) \wedge \left(\circledast(\beta', p, u, v)\right);\\
&\circledast(\beta^*, p, u, v) \Leftrightarrow \left([u = v]\right) \vee \left(\circledast(\beta; (\beta^*)\, p, u, v)\right);\\
&\circledast(s', p, u, v) \Leftrightarrow \left(s \in \left(w, p(u)\right)\right).
\end{aligned}
\qquad (4.110)
$$

Використання введених модально-темпоральних операторів забезпечує подання необхідних, можливих і наступних станів траєкторії операторської

діяльності, а також послідовних, альтернативних і паралельних варіантів реалізації плану швартовного маневру.

Запропоновані логіко-формальні підходи дали змогу відокремити етапи формування траєкторії дій у вигляді плану, а також описати вплив індивідуальних стратегій поведінки на кінцевий результат. Водночас отримані результати не слід трактувати як остаточну діагностику втоми без порівняння із зовнішнім еталоном $F^{*}(t)$ [242].

4.6. Моделі ідентифікації критичних ситуацій та прогнозування дій оператора в ергатичних системах керування рухом судна

Логічним продовженням положень, розвинених у розділах 1–3, є перехід від загального опису інформаційного поля оператора, структури ергатичного контуру та закономірностей впливу людського фактора до побудови формалізованих моделей ідентифікації критичних ситуацій і прогнозування дій оператора у процесі управління судном. Якщо у попередніх підрозділах було обґрунтовано роль когнітивно-психофізіологічних, інформаційних та поведінкових чинників у формуванні якості судноводіння, то в даному підрозділі ці положення конкретизуються у вигляді прикладної моделі, придатної для автоматизованого виявлення небезпечних станів, оцінювання ризику та підтримки прийняття рішень в умовах навігаційної невизначеності.

Необхідність побудови таких моделей зумовлена тим, що критична ситуація в ергатичній системі управління судном виникає не лише як наслідок зовнішніх навігаційних загроз, а й як результат невідповідності між реальною ситуацією, її інтерпретацією оператором, темпоральними обмеженнями на прийняття рішення та стійкими індивідуальними моделями поведінки [61]. Саме тому завдання цього підрозділу полягає у формуванні єдиного формально-аналітичного опису, який поєднує параметри сприйняття ситуації, ознаки схожості з попереднім досвідом, показники емоційного напруження [341], *p*-адичну складність етапу, командну синхронізацію та прогноз результативності дій у вузлах дерева рішень [232].

Залежно від значення ступеня схожості виникає логічний зв'язок між

поточною ситуацією β і найближчою за контекстом ситуацією з попереднього досвіду α. Тоді порівняння двох найбільш близьких ситуацій визначається як: $D_\alpha \subseteq \mathcal{D}$, $D_\beta \subseteq \mathcal{D}$, де D_α і D_β – множини ознак відповідно попередньої та поточної ситуацій. Тоді міра подібності задається як:

$$Sim(\alpha,\beta) = \frac{\left|D_\alpha \cap D_\beta\right|}{\left|D_\alpha \cup D_\beta\right|}. \tag{4.111}$$

Властивості:

$$\begin{gathered} 0 \le Sim(\alpha,\beta) \le 1, \\ Sim(\alpha,\beta) = Sim(\beta,\alpha), \\ Sim(\alpha,\beta) = 1 \Leftrightarrow D_\alpha = D_\beta, \\ Sim(\alpha,\beta) = 0 \Leftrightarrow D_\alpha \cap D_\beta = \varnothing. \end{gathered} \tag{4.112}$$

Формула (4.111) є нормованою мірою Жаккара для порівняння ознакових доменів ситуацій.

Далі слід визначити, чим нижчою є вираженість емоційно-фізіологічної реакції в ситуації β, тим складніше відокремити її від ситуації α:

$$\begin{gathered} \forall \alpha,\beta \;\; if \;\; \{\tau / T\} \le \{\tau / T'\} \Rightarrow \\ 0 \le \mathrm{Sim}(\alpha,\beta \,|\, \{\tau / T\}) \le \mathrm{Sim}(\alpha,\beta \,|\, \{\tau / T'\}) \le 1. \end{gathered} \tag{4.113}$$

Зрозуміло, що залежно від повноти $\{G(\tau)\}$, з'являється можливість визначення максимальної міру подібності α і β:

$$\mathrm{Sim}(\alpha,\beta \,|\, \{G(\tau)\}) = \max_{\{\tau/T\}^\wedge} \mathrm{Sim}(\alpha,\beta \,|\, \{\tau / T\}), \;\; M = \prod\nolimits_{\tau \in \{\tau\}} \left\| [G(\tau)] \right\|, \tag{4.114}$$

де M – кількість збігів, а $\{\tau / T\}^\wedge$ – сукупність термінальних доменів.

Отже, існує ймовірність збільшення ризику морських катастроф через відсутність фактора «розрізнення» двох ситуацій $\{\tau / T\}_\alpha \approx \{\tau / T\}_\beta$. Єдиною можливою ознакою розрізнення залишається контекст ситуації з близькими за своєю силою емоційними сплесками:

$$K^{em} = \langle \Omega(Z), \{G(\tau)\}, \{S\} \rangle, \tag{4.115}$$

тоді:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Con}\left(\alpha,\beta \mid K^{em}\right)=1 \Leftrightarrow z_{\alpha}=z_{\beta}, \\ &\text{else } \mathrm{Con}\left(\alpha,\beta \mid K^{em}\right)<1, \end{aligned} \tag{4.116}$$

де S – реакції, сформовані на основі досвіду.

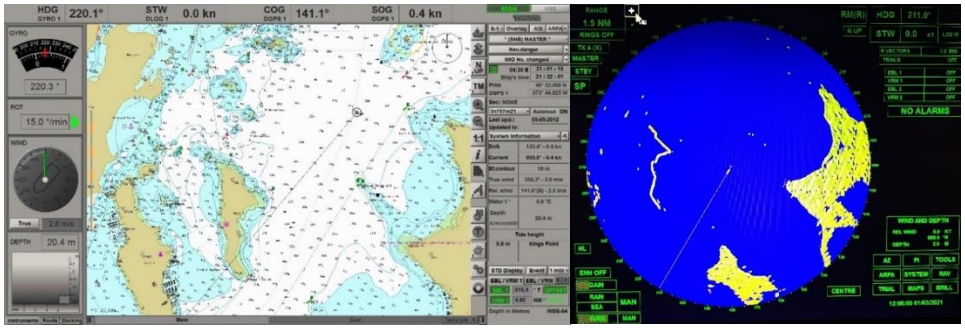
Важливим компонентом моделі є також формалізація глибини ідентифікації навігаційної ситуації оператором. Для цього використано p-адичне представлення, у межах якого складність ситуації визначається набором активних джерел навігаційної інформації та рівнем деталізації їх обробки [142].

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 p + \alpha_2 p^2 + \ldots + \alpha_{n-1} p^{n-1}. \tag{4.117}$$

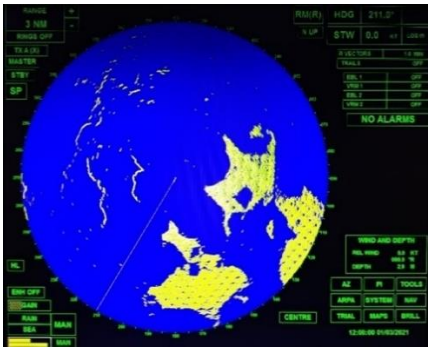
При цьому можливі ситуації, коли різні форми їх сприйняття за допомогою p-адичності можуть бути об'єднані в одну систему шляхом перетворення форм кодування. Це може мати місце у тому випадку, коли для певного фрагмента завдання беруть участь кілька приладів з різними рівнями деталізації. Тоді значення p-адичності, що характеризує складність ситуації, визначається за крайнім правим ненульовим розрядом виразу $\alpha_{n-1}p^{n-1}$.

Слід врахувати, що концентрація уваги оператора максимальна в α_0 і слабшає в $\alpha_{i+1,\ldots,m}$, що вказує на пріоритет елемента. Отже, під час виконання навігаційного завдання, можна визначити два критичних параметри:

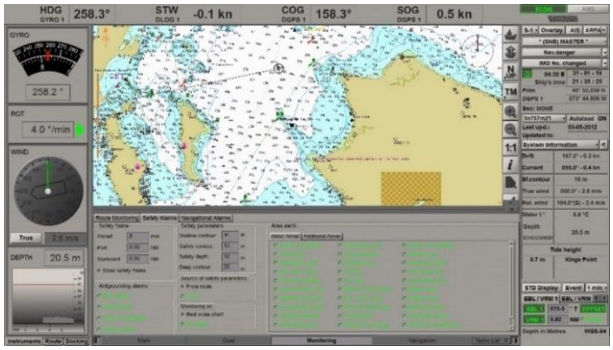
Перший параметр: «максимальна глибина охоплення та ідентифікації» поточної ситуації. Цей параметр описує процес охоплення увагою оператора першоджерела сигналу (в прийнятій p-адичності). Чим далі заходить оператор уздовж ланцюга подій, тим більшою кількістю даних він оперує, а отже, – тим глибша ідентифікація (рис. 4.30).



а *б*



в



г

Рисунок 4.30. Складність ситуації: *а* – ідентифікація $p_{t1} = 3$; *б* – ідентифікація $p_{t2} = 4$; *в* – ідентифікація $p_{t3} = 5$; *г* – ідентифікація $p_{t4} = 7$

Так, на рисунку 4.30 видно, що ситуація такого завдання, як «Аналіз навігаційних небезпек на маршруті слідування», фрагментована на чотири етапи.

Для кожного етапу t_i p-адична складність визначається як:

$$C_p(t_i) = p_{t_i}.$$

Нормована p-адична складність: $C_p^*(t_i) = \dfrac{p_{t_i} - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}$.

Для наведеного прикладу, де $p_{\min} = 3,\ p_{\max} = 7$:

$$\begin{aligned} C_p^*(t_1) &= \frac{3-3}{7-3} = 0,\ C_p^*(t_2) = \frac{4-3}{7-3} = 0.25, \\ C_p^*(t_3) &= \frac{5-3}{7-3} = 0.50,\ C_p^*(t_4) = \frac{7-3}{7-3} = 1.00. \end{aligned} \tag{4.118}$$

Як джерело навігаційної інформації виступає електронна картографічна навігаційно-інформаційна система (ECDIS), яка на певних етапах може мати різну p-адичність. Аналіз цієї ситуації свідчить про зростання складності її сприйняття з боку оператора, оскільки p-адичність збільшується з кожним наступним етапом і супроводжується збереженням підвищених показників.

Фізіологічний індикатор: $E_{phys}(t) \in [0,1]$

Когнітивна невизначеність ситуації: $C_{unc}(t) \in [0,1]$.

Ризикова інтерпретація ситуації:

$$\begin{aligned} R(t) &= \lambda_1 E_{phys}(t) + \lambda_2 C_{unc}(t) + \lambda_3 P_{nav}(t), \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 &= 1,\ \lambda_i \geq 0. \end{aligned} \tag{4.119}$$

Критична ситуація:

$$K_{crit}(t)=\begin{cases}1,\ R(t)\geq\theta_R,\\ 0,\ R(t)<\theta_R.\end{cases} \tag{4.120}$$

Тут $E_{\text{phys}}(t)$ – не критична ситуація, а лише фізіологічний індикатор; $C_{\text{unc}}(t)$ – когнітивна невизначеність; $P_{\text{nav}}(t)$ – навігаційна небезпека; $K_{\text{crit}}(t)$ – підсумкова класифікація критичності.

Другий параметр: зафіксований «емоційний сплеск». Розглянемо формальний опис цього параметра. Кожний ідентифікований емоційно-фізіологічний сплеск у моделі подається як атрактор $\alpha_j^{(n)}$, то формування траєкторії дій, починаючи з першого фрагмента, буде здійснюватися за принципом $x_0\in U_{1/p}\left(\alpha_j^{(n)}\right)$. У реальному експерименті така ситуація буде спочатку мати підвищені емоційно-фізіологічні показники (пульс та сатурацію) незалежно від того, на якому рівні p-адичності побудовані етапи траєкторії:

$$\alpha_j^{(n)}=h_0^j+h_1^j p+\ldots+h_{n-1}^j p^{n-1},\ (s,p)\neq 1. \tag{4.121}$$

Водночас встановлено, що незнайома ситуація підвищує рівень емоційного сплеску протягом усієї задачі, що підтверджує наявність аттрактора $\alpha_j^{(n)}$ в ситуації B_i.

Другий момент є найважливішим, коли спостерігається гострий «емоційний сплеск» на етапі $h_{v^{em}}^j$, де $v_{t_i}^{em}>\max\Delta v^{em}$, за Δv^{em} прийнято середнє індивідуальне значення пульсу/сатурації для результативного виконання операції. Цей фактор безпосередньо впливає на збільшення складності поточного етапу $h_{v^{em}}^j$, траєкторії дій оператора.

Отже, наприклад, якщо на етапі α_1 виник «емоційний сплеск» вище середньої, з нормованою інтенсивністю, що відповідає рівню 2, то вплив сплеску враховується на наступних етапах $\alpha_j^{(n)}$, де j=2,3 …, буде розподілено вплив «емоційного сплеску» сили $\alpha_j^{(n)}=2$. При цьому траєкторія дій оператора може бути представлена у вигляді моделі $\{A\}$ щодо об'єктів локації $V_1,\ldots,V_m$ у вигляді опису $S_1(A)$, …, $S_m(A)$.

Моделі поведінки оператора щодо V_1, …, V_m, ідентифікуються як фактори впливу на комплекс суднових технічних засобів. Більше того, ∀{A} визначається набором числових параметрів управління ергатичною системою, π_1, …, π_q. Тоді: $S_1(A)=S_1(\pi_1, \ldots, \pi_q)$, …, $S_m(A)=S_m(\pi_1, \ldots, \pi_q)$. У межах дослідження важливо визначити контекст ситуації, супроводжуваної «емоційним сплеском» під час виконання задачі.

Враховуючи складність процесу ідентифікації впливу операторів на ефективність функціонування ергатичних систем управління судном, була побудована модель, заснована на аналізі поведінки кожного оператора суднової вахти. При цьому враховувався показник їх емоційного сплеску відносно позначених етапів, визначених моделлю дій капітана. Такий підхід дав змогу збільшити достовірність ідентифікації порушень або збоїв під час виконання колективних дій [264].

Таким чином, первинне завдання полягало в синхронізації результатів експерименту відносно ідентифікованої траєкторії уваги всіх членів вахти. Це дозволило, враховуючи навігаційну ситуацію, з достатньо високою точністю передбачити послідовність уваги членів вахти на основі центральної послідовності уваги капітана. Синхронізація дій вахти може бути ідентифікована на основі контексту $K=(G, M^*, I)$, де G – інтегральний показник параметрів систем ECDIS, ARPA, AIS.

Збіг атомарних дій Ω в ланцюгу траєкторії передбачає формування опосередкованих ознак M^*, таких, що $I \subset G \times M^*$, де I – множина модельних збігів ситуацій на траєкторії маршруту. Враховуючи, що важливою передумовою для формування траєкторії сприйняття навігаційної ситуації є первинно сформовані досвідчені зв'язки $\underline{\tau}/T_0$ операторів, то Ω={α(τ/T0)}. А критерій збігів буде представлений у вигляді контексту.

$$K^{coll}_{\{\tau/T\}} = \left(\Omega, \left\{G(\tau)\right\}, I_{\{\tau/T\}}\right) \Rightarrow I_{\{\tau/T\}} \subseteq \Omega \times M^*_{\{\tau/T\}}. \qquad (4.122)$$

Своєю чергою $K^{coll}_{\{\tau/T\}}$, визначає ступінь відповідності ситуації стосовно колективного сприйняття групи елементів ергатичної системи – навігаційної вахти. При цьому $K^{coll}_{\{\tau/T\}}$ також базується на сформованих колективних передумов (схильностей) сприйняття стосовно поточного навігаційного

завдання *Z*, отримані у результаті аналізу багатьох попередніх рішень з позитивним ефектом, таких, що $\Omega^{coll}(Z)=\left\{\alpha\left(\{S\}_{\alpha},\underline{z}/Z\right)\right\}$.

Це змінює структуру контексту $K^{coll}_{\{\tau/T\}}$ та формує відношення загальнокомандної схильності до ситуації. У результаті аналізу поведінки кожного члена навігаційної вахти з'являється можливість виділити концептуальні обмеження у сприйнятті поточної ситуації вахтою. При цьому визначено межі впливу контексту $K^{coll}_{\{\tau/T\}}$ на процес ідентифікації ситуації з боку членів навігаційної вахти. Так, наприклад, отриманий досвід двох операторів, *A* та *B*, щодо типової ситуації, але в різних локаціях (портах), сформовано відповідний ознаковий простір, такий, що:

$$A'(B')=\left\{m(g)\in M(G)\,|\,\forall g(m)\in A(B)(g\,I\,m)\right\}. \tag{4.123}$$

При цьому важливо оцінити, наскільки близькими були ці ознакові простори сприйняття навігаційної ситуації різними операторами в складі вахти. Логічно припустити, що атомарні дії операторів $\{\alpha\}\subseteq\Omega$, у момент виконання завдання *Z*, продукували властивості відповідності поточної ситуації відносно контексту $K_{\{b/B\}\cup\{a/A\}}$:

$$\{\alpha\}'|_{\{\tau/T\}}=\left\{\underline{b}/B\in M_{\{\tau/T\}}\,|\,\forall\alpha\in\{\alpha\}\left(\alpha\,I_{\{\tau/T\}}\underline{b}/B\right)\right\}. \tag{4.124}$$

Чим сильніший вплив контексту і чим ближча траєкторія уваги членів вахти до стратегії капітана, тим вища ефективність ергатичної системи управління рухом судна [193].

Для вахти: $\mathcal{W}=\{C,O,H\}$.

де *C* – капітан, *O* – вахтовий помічник, *H* – стерновий.

Вектор ознак дій кожного учасника:

$$z_u(t)=\left(z_{u1}(t),z_{u2}(t),...,z_{um}(t)\right),\ u\in\mathcal{W}. \tag{4.125}$$

Подібність дій учасника *u* до траєкторії капітана:

$$s_u(t)=Sim\left(z_u(t),\ z_C(t)\right),\ 0\le s_u(t)\le 1. \tag{4.126}$$

Колективний контекст:

$$K_{coll}(t)=\sum_{u\in\mathcal{W}}\gamma_u s_u(t),\ \sum_{u\in\mathcal{W}}\gamma_u=1,\ \gamma_u\ge 0. \tag{4.127}$$

Так, для конкретної вахти були отримані значення:

$$\begin{gathered}\gamma_C = 0,50,\ \gamma_O = 0,30,\ \gamma_H = 0,20\\ s_C = 1,00,\ s_O = 0,82,\ s_H = 0,74\\ K_{coll} = 0,50 \cdot 1,00 + 0,30 \cdot 0,82 + 0,20 \cdot 0,74\\ K_{coll} = 0,894\end{gathered} \tag{4.128}$$

Значення $K_{\text{coll}} = 0,894$ означає високий рівень синхронізації дій вахти з траєкторією капітана в межах заданого фрагмента навігаційної ситуації.

З'явилася можливість визначати траєкторії, які відрізняються від передбачуваних, особливо в ситуаціях, коли рівень *p*-адичності досить високий і відповідає необхідній глибині часової ідентифікації навігаційної ситуації $I^t_{\{S\}}$, такий, що:

$$\begin{gathered}\{\alpha\}'|_{\{S\}} = \left\{S \in \{S\} \mid \forall \alpha \in \{\alpha\}\left(\alpha\, I^t_{\{S\}} S\right)\right\} \Rightarrow\\ \{S_i\}'|_{\{S\}} = \left\{\alpha \in \Omega \mid \forall S \in \{S_i\}\left(\alpha\, I^t_{\{S\}} S\right)\right\}.\end{gathered} \tag{4.129}$$

У таких ситуаціях, автоматизована система відстежувала активність суб'єктів ергатичної системи і активувала модуль аналізу фізіологічних параметрів з метою визначення наявності «емоційних сплесків» під час проходження фрагментів цього маршруту.

Таким чином, для кожної типової ситуації з'являється множина $\{S\}^{t_{j\ldots n}}_{\Omega j} = \cap_{\alpha \in \Omega j}\{S\}_\alpha,\ j \in Z,$ ситуацій із близькими часовими характеристиками. Сформовані таким чином множини визначають область взаємодії оператора з об'єктами і суб'єктами ергатичної системи у заданому діапазоні: $\{S\}^{\perp}_{\ j} = \{S\}_j \setminus \{S\}^{t_{j\ldots n}}_{\Omega j},\quad \{S\}^{t_{j\ldots n}}_{\Omega j} = \varnothing.$ Таким чином, з'явилася можливість визначення тих ознак, які не входять до зони близьких й ідентифікуються оператором як «нерозпізнана» ситуація. Детермінантом виникнення такої ситуації в ланцюгу алгоритму був стійкий «емоційний сплеск», постійний рівень емоційного напруження. Показником складності ситуації був підвищений і не згасаючий пульс та знижена сатурація $\{R\}$. Порівнюючи часові показники реакцій оператора в зоні емоційно-фізіологічного сплеску t^* з відповідними показниками у попередньому стабільному стані, можна оцінити невідповідність ситуації первинним очікуванням.

Нехай очікуваний сценарій задано послідовністю: $S^{exp} = \left(s_1^{exp}, s_2^{exp}, \ldots, s_m^{exp}\right)$

Фактичний сценарій: $S^{fact} = \left(s_1^{fact}, s_2^{fact}, ..., s_m^{fact}\right)$.

Часова невідповідність: $\Delta T = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left|t_i^{fact} - t_i^{exp}\right|$.

Структурна невідповідність: $\Delta S = 1 - Sim\left(S^{exp}, S^{fact}\right)$.

Інтегральний показник невідповідності сценарію:

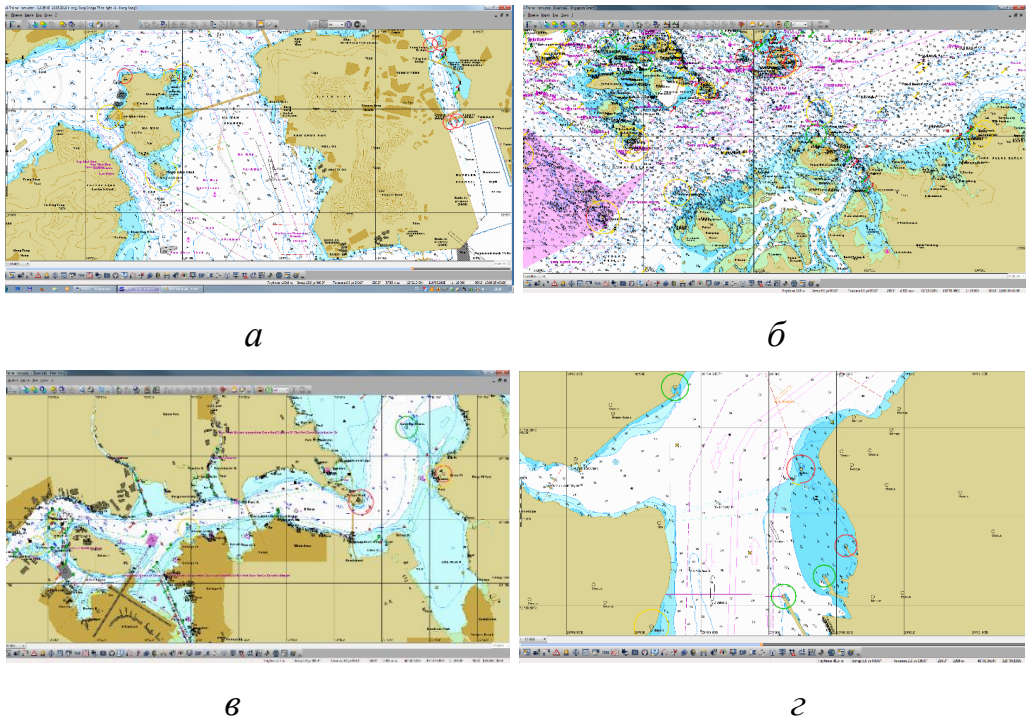
$$M_{mis} = \eta_T \Delta T^* + \eta_S \Delta S,\ \eta_T + \eta_S = 1,\ \eta_T, \eta_S \geq 0. \qquad (4.130)$$
$$\Delta T^* \in [0,1],\ \Delta S \in [0,1].$$

Критерій нетипової ситуації:

$$U_{\text{int}}(t) = \begin{cases} 1,\ M_{mis} \geq \theta_U, \\ 0,\ M_{mis} < \theta_U. \end{cases} \qquad (4.131)$$

де M_{mis} – показник невідповідності між очікуваним і фактичним сценарієм, а $U_{int}(t) = 1$ означає невпізнану або нетипову ситуацію.

Для прикладної постановки задачі та демонстрації можливості використання запропонованих моделей було розглянуто сценарії, відтворені в середовищі NTPRO 5000 (рис. 4.31).



а *б*

в *г*

Рисунок 4.31. Використані локації при проведенні моделювання в NTPRO 5000: *а* – Гонконгська протока (HK); *б* – Сінгапурська протока (Sp); *в* – Іст-Рівер, США (NY); *г* – Босфорська протока, Туреччина (BT)

Апробацію проведено на базі науково-дослідної лабораторії «Розробки систем підтримки прийняття рішень, ергатичних і автоматизованих систем управління рухом судна». У межах розділу 4 ці матеріали використовуються для формування простору ознак критичних ситуацій, визначення факторів Fs1–Fs9 і Fr1–Fr5 та підготовки CART-моделі. Її повна експериментальна інтерпретація, прогнозне дерево та правила переходів подані у розділі 6.

Сформовано узагальнену модель впливу людського фактора. Визначивши основні значущі фактори, які впливають на ергатичну систему управління рухом судна, виникла можливість побудувати узагальнену модель впливу людського фактора на ергатичні системи судноплавства в критичних ситуаціях (рис. 4.32).

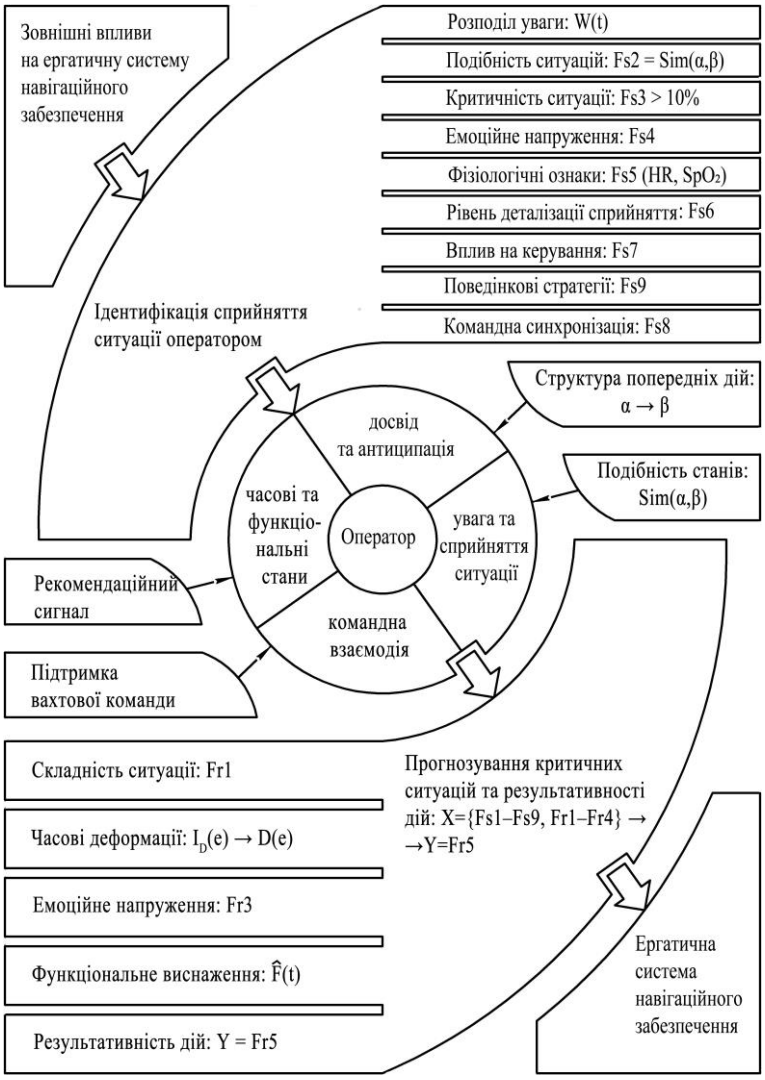


Рисунок 4.32. Узагальнена модель впливу людського фактора на ергатичну систему управління рухом судна

Для забезпечення відтворюваності подальшого прогнозування необхідно визначити статус порогових значень, використаних у факторах Fs1–Fs9 та Fr1–Fr5. У межах цього підрозділу такі пороги не слід трактувати як універсальні фізіологічні або навігаційні константи. Їх доцільно розглядати як робочі порогові значення, що використовуються для первинної класифікації ситуацій у межах обраної експериментальної постановки.

Формально кожний фактор F_k може бути поданий через правило:

$$F_k(x) = \begin{cases} 0, & x < \theta_k, \\ 1, & x \geq \theta_k \end{cases}, \tag{4.132}$$

де x – вимірюваний або розрахунковий параметр; θ_k – порогове значення відповідного фактора. Якщо фактор має не бінарну, а інтервальну природу, доцільно використовувати нормовану шкалу:

$$F_k(x) = clip\left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, 0,1\right), \tag{4.133}$$

де x_{min} та x_{max} задають нижню та верхню межі інтервалу, а оператор clip(·) обмежує значення в діапазоні [0;1].

Таблиця 4.8. Паспорт порогових значень факторів Fs_1–Fs_9 та Fr1–Fr5

Фактор	Порогове значення / діапазон	Що оцінює	Джерело порога	Статус порога	Коментар щодо застосування
Fs_1	0,1…0,5 nm	небезпека руху поблизу об’єктів	ECDIS / експертне правило / статистика	емпіричний	використовується як зона підвищеної уваги
Fs_2	0…1	повнота подібності ситуацій	алгоритмічна оцінка	модельний	нормований індекс схожості
Fs_3	>10%	ризик нерозрізненості ситуацій	емпірична / експертна оцінка	емпіричний	потребує пояснення процедури порівняння
Fs_4	0,2…0,5 nm	збіг емоційного сплеску біля маршрутної точки	експеримент / експертне правило	емпіричний	бажано обґрунтувати через розподіл подій
Fs_5	>135 bpm; SpO_2 < 96%	пульс і сатурація	фізіологічні дані / література / експертне правило	емпіричний	не є самостійною діагностикою стресу
Fs_6	p = 3…n	p-адична складність	модельне правило	модельний	потребує пояснення шкали

Продовження таблиці 4.8

Fs_7	0…1	нормований ситуаційний індикатор	алгоритмічна оцінка	модельний	використовується як допоміжний фактор
Fs_8	>85%	рівень відповідності / синхронізації	емпірична або експертна оцінка	емпірично уточнюваний	потрібна процедура оцінювання
Fs_9	>70%	рівень прогнозної або поведінкової відповідності	емпірична або експертна оцінка	емпірично уточнюваний	потребує валідації
Fr1	0…1	зростання складності ситуації	*p*-адична модель	модельний	інтерпретувати як структурний індикатор
Fr2	0…1	темпоральна зіставність	нормована оцінка	модельний	потрібно описати нормування
Fr3	>30%	ознака нерозпізнаної ситуації / емоційного підйому	емпірична / експертна оцінка	емпірично уточнюваний	потребує зовнішньої валідації
Fr4	>1,4Δt	тривале часове відхилення	емпірична оцінка / експертне правило	емпірично уточнюваний	треба пояснити вибір множника 1,4
Fr5	успішно / неуспішно	результативність виконання завдання	результат експерименту	цільова змінна	використовується як клас у CART

Для того щоб CART-модель виконувала не лише ілюстративну, а й прогнозну функцію, необхідно задати процедуру її навчання та валідації. У межах цієї роботи вхідними ознаками моделі виступають фактори: $X = \{Fs_1,...,Fs_9,Fr_1,...,Fr_4\}$, а цільовою змінною є результативність виконання завдання: $Y = Fr_5 \in \{0,1\}$, де $Y = 1$ відповідає успішному виконанню завдання, а $Y = 0$ – неуспішному.

$$\mathbf{F}^*(t) = \left(Fs_1^*(t),...,Fs_9^*(t),Fr_1^*(t),...,Fr_4^*(t)\right), \tag{4.134}$$

$$R_F(t) = \sum_{k=1}^{13} \beta_k F_k^*(t),\ \sum_{k=1}^{13} \beta_k = 1,\ \beta_k \geq 0.$$

де $F_k^*(t) \in [0,1]$ – нормований фактор, $R_F(t)$ – інтегральний факторний індикатор, β_k – ваговий коефіцієнт фактора.

Загальна вибірка спостережень подається у вигляді:

$$D = \left\{\left(X_i, Y_i\right)\right\}_{i=1}^{N}, \tag{4.135}$$

де N – кількість експериментальних сценаріїв або фрагментів, використаних для побудови дерева рішень.

Для перевірки узагальнювальної здатності моделі дані необхідно розділити на навчальну та тестову частини: $D = D_{train} \cup D_{test}$, $D_{train} \cap D_{test} = \varnothing$.

Якщо обсяг вибірки є обмеженим, замість одноразового поділу на навчальну і тестову вибірки доцільно використовувати k-кратну перехресну перевірку:

$$CV_k = \frac{1}{k}\sum_{r=1}^{k} Q_r \,, \tag{4.136}$$

де Q_r – значення обраної метрики якості на r-й валідаційній підвибірці (фолді).

Для зменшення ризику перенавчання застосовується обрізка дерева (pruning), тобто обмеження глибини дерева, мінімальної кількості спостережень у листі або складності дерева. Оптимальна структура дерева визначається не за максимальною точністю на навчальній вибірці, а за якістю на валідаційних або тестових даних: $T^* = \arg\max_{T \in \mathcal{T}} Q_{val}(T)$.

$$Q_{val}(T) = \lambda_1 Accuracy(T) + \lambda_2 Recall(T) + \lambda_3 Specificity(T). \tag{4.137}$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1,\ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0\,. \tag{4.138}$$

де T^* – обране дерево рішень, T – множина допустимих дерев, $Q_{\text{val}}(T)$ – інтегральний критерій якості на валідаційних даних.

Далі, після побудови дерева наведемо матрицю помилок (табл. 4.9)

Таблиця 4.9. Матриця помилок CART-моделі

Стан	Прогноз: успішно	Прогноз: неуспішно
Фактично успішно	(TP)	(FN)
Фактично неуспішно	(FP)	(TN)

На її основі визначаються основні метрики якості:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}\,, \tag{4.139}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \tag{4.140}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \tag{4.141}$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}. \tag{4.142}$$

Зазначені фактори відіграють важливу роль у формуванні комплексного розуміння ситуації на судні [141, 346]. Застосування такого деталізованого аналізу дає змогу оптимізувати процеси управління, враховуючи специфіку роботи оператора та взаємодію з ергатичною системою управління судном. Дослідження впливу «людського фактора» є важливим етапом у розробленні систем безпеки судноплавства. Оскільки людина є важливим елементом у керуванні судном, врахування цього фактора є вирішальним для забезпечення ефективності та безпеки судноплавства [62].

У цьому контексті розроблення моделі, яка враховує «людський фактор», є важливим кроком у створенні ефективних систем управління та моніторингу в судноплавстві.

Таким чином, з’являється можливість моделювати процеси управління рухом судна в ергатичних системах на прикладі чотирьох локацій: Гонконгської протоки, Сінгапурської протоки, Іст-Ріверу (Нью-Йорк), Босфорської протоки.

У ході аналізу було визначено, що базові фактори локацій достатньо близькі за своїми характеристиками. Це дає змогу узагальнити дані для визначення закономірностей (табл. 4.10).

Таблиця 4.10. Ознакова матриця сценаріїв для формування CART-моделі критичної ситуації

Location code	Fs1	Fs2	Fs3	Fs4	Fs5	Fs6	Fs7	Fs8	Fs9	Fr1	Fr2	Fr3	Fr4	Fr5
HK1	0,2	0,9	1	0,3	1	6	0,4	1	0	1	0,8	0	1	Yes
Sp1	0,3	0,8	1	0,2	0	4	0,3	1	0	0	0,8	0	0	Yes
NY1	0,1	1	1	0,2	0	5	0,1	0	1	0	0,7	0	1	Yes
BT1	0,1	0,8	0	0,5	1	6	0,5	0	0	1	0,3	1	1	Yes
HK2	0,3	0,8	0	0,3	0	3	0,3	1	0	0	0,8	0	0	Yes
Sp2	0,3	1	0	0,3	0	5	0,3	1	0	0	0,9	0	0	Yes
NY2	0,2	0,9	0	0,2	1	4	0,2	1	1	0	0,8	0	0	Yes

Продовження таблиці 4.10.

BT2	0,1	0,8	0	0,5	1	7	0,6	0	0	1	0,7	1	1	Yes
HK3	0,2	0,9	1	0,2	0	4	0,4	1	0	0	0,9	0	0	No
Sp3	0,3	0,7	1	0,4	0	7	0,6	0	1	0	0,1	1	1	Yes
NY3	0,2	1	1	0,3	0	4	0,3	1	1	1	0,8	0	0	Yes
BT3	0,2	0,8	0	0,4	0	5	0,3	0	0	0	0,7	1	1	Yes
HK4	0,3	1	0	0,4	0	6	0,4	1	0	0	0,6	1	1	Yes
Sp4	0,4	0,8	0	0,3	1	4	0,3	1	1	1	0,8	0	0	Yes
NY4	0,1	0,9	1	0,5	1	4	0,8	0	0	0	0,6	1	1	No
BT4	0,1	0,8	1	0,2	0	3	0,3	1	0	0	0,9	0	0	Yes
HK5	0,3	1	1	0,2	0	7	0,2	1	0	1	1	0	0	Yes
Sp5	0,4	0,8	1	0,3	0	4	0,5	0	1	0	0,7	0	1	Yes
NY5	0,1	0,9	1	0,3	0	4	0,4	1	0	0	0,5	1	1	No
BT5	0,2	0,9	1	0,5	1	7	0,7	0	1	0	0,9	0	0	No
HK6	0,2	0,7	1	0,4	1	8	0,7	0	1	1	0,2	1	1	Yes
Sp6	0,3	1	1	0,3	0	4	0,3	1	0	0	0,8	0	0	No
NY6	0,3	1	1	0,4	0	5	0,2	1	1	1	0,9	0	0	Yes
BT6	0,3	0,8	1	0,2	0	4	0,7	1	0	0	1	0	0	Yes
HK7	0,4	0,9	0	0,2	1	6	0,1	1	0	0	0,8	0	1	Yes
Sp7	0,4	1	0	0,4	1	7	0,6	0	1	1	0,5	1	1	Yes
NY7	0,2	0,6	0	0,4	1	9	0,5	0	0	1	0,7	1	1	Yes
BT7	0,1	0,9	1	0,3	1	5	0,1	1	1	1	1	0	0	Yes
HK8	0,3	0,9	0	0,2	1	6	0,1	1	0	0	0,8	0	0	Yes
Sp8	0,4	0,9	0	0,3	1	8	0,6	1	0	1	0,5	1	1	Yes
NY8	0,3	0,7	1	0,4	0	9	0,6	0	0	1	0,6	1	1	Yes
BT8	0,1	0,8	1	0,3	1	6	0,1	1	1	1	1	1	0	Yes
HK9	0,3	0,9	1	0,3	1	6	0,4	1	0	1	0,8	1	1	Yes
Sp9	0,3	0,9	0	0,2	0	5	0,3	1	1	0	0,7	0	1	Yes
NY9	0,1	0,9	1	0,3	1	5	0,2	1	1	1	0,8	0	1	Yes
BT9	0,2	0,8	0	0,5	1	6	0,5	0	0	1	0,3	1	1	Yes
HK10	0,3	1	0	0,4	0	6	0,4	1	0	0	0,6	1	1	Yes
Sp10	0,4	0,9	1	0,3	1	5	0,4	1	1	1	0,8	0	1	Yes
NY10	0,2	0,9	1	0,6	1	4	0,8	1	1	1	0,8	1	1	Yes
BT10	0,1	0,8	1	0,2	1	3	0,3	1	0	0	0,9	0	0	Yes
HK11	0,5	0,9	0	0,2	1	6	0,1	1	0	0	0,8	0	1	No
Sp11	0,4	0,9	0	0,4	1	7	0,6	1	1	1	0,5	1	1	No
NY11	0,3	0,7	1	0,5	0	9	0,5	0	0	1	0,7	1	1	Yes
BT11	0,1	0,9	1	0,3	1	7	0,2	1	0	0	0,5	0	1	No

При цьому необхідно врахувати, що фактори Fs1-9 і Fr1-5 представлені в наступних діапазонах параметрів: Fs1 (0,1…0,5 nm); Fs2 (0…1); Fs3 (>10 %); Fs4 (0,2…0,5 nm); Fs5 (>135 bpm, 96 % <saturation); Fs6 (p=3…n); Fs7 (0…1); Fs8 (>85 %); Fs9 (>70 %); Fr1 (p_{i+m}, (m>2); Fr2 (0…1); Fr3 (>30 %); Fr4 (>1,4 Δt); Fr5 (успішно/неуспішно).

Для побудови дерев прийняття рішень засобами інтелектуального аналізу даних (Data Mining) застосовано модель побудови класифікаційних і алгоритм CART, у якому критерієм точності виступає індекс *Gini* [343]. У

випадку, коли множина даних T містить n класів, то індекс *Gini* (G_{Gini}) дорівнює:

$$G_{Gini}(T) = 1 - \sum_{i=1}^{n} p_i^2, \tag{4.143}$$

де p_i – ймовірність класу i в T. В розглянутій задачі на основі алгоритму CART, T розбивається на дві частини T_1 та T_2 з кількістю прикладів в кожному N_1 та N_2 відповідно, тоді показник якості розбиття буде дорівнювати:

$$G_{split}(T) = \frac{N_1}{N}. G_{Gini}(T_1) + \frac{N_2}{N} \cdot G_{Gini}(T_2), \tag{4.144}$$

де $N = N_1 + N_2$.

При побудові дерев прийняття рішень приймемо, що N – кількість прикладів у вузлі – предку, а L, R – кількість прикладів відповідно в лівому та правому нащадку, то l_i та r_i – кількість екземплярів i-го класу в лівому/правому нащадку:

$$G_{split} = \frac{L}{N} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{l_i}{L}\right)^2\right) + \frac{R}{N} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{r_i}{R}\right)^2\right) \to \min. \tag{4.145}$$

Найкращим буде розбиття, для якого величина максимальна:

$$G_{split} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i^2 + \frac{1}{R} \cdot \sum_{i=1}^{n} r_i^2 \to \max. \tag{4.146}$$

Сформований набір факторів Fs1–Fs9 і Fr1–Fr5 створює ознакову основу для побудови CART-моделі прогнозування критичних або квазікритичних ситуацій. У межах Розділу 4 визначено структуру факторів, логіку їх нормування, цільову змінну Fr5 та математичний апарат для побудови дерева рішень. Конкретна побудова прогнозного дерева, інтерпретація його вузлів і узагальнені правила переходів наведені у розділі 6 як частина інтегральної експериментальної перевірки прогнозно-керувального контуру ІСНЗ.

Для методичного обґрунтування подальшої експериментальної перевірки було сформовано ознакову базу та математичний апарат для побудови CART-моделі критичних ситуацій. Повна побудова дерева прогнозу, інтерпретація вузлів і перевірка результативності моделі наведені у розділі 6. Для навчання моделі використано базу даних параметрів управління судном у

чотирьох локаціях, що дозволило побудувати дерево рішень, у вузлах якого визначено прогнозовану результативність [144]. За результатами оброблення даних на основі типових операцій управління судном виникла можливість створити клас уніфікованих критичних ситуацій зі схожою структурою прийняття рішень [217, 267, 278, 316].

4.7. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розв’язано комплекс взаємопов’язаних задач, спрямованих на формалізацію, ідентифікацію та прогнозування когнітивних і психофізіологічних станів оператора в процесах управління рухом судна. Отримані результати безпосередньо відповідають другому основному завданню дисертації, пов’язаному зі створенням апарату ідентифікації та прогнозування станів оператора, а також частково забезпечують виконання третього і четвертого головних завдань, що стосуються оцінювання ризиків людського фактора, розроблення засобів діагностики, прогнозування та підтримки рішень у судноводінні. Водночас ці результати логічно спираються на методологічні засади, сформовані у розділах 1 і 2, де інформаційне поле оператора, параметри руху судна, навігаційна ситуація та людський фактор були розглянуті як взаємопов’язані складові єдиного ергатичного контуру управління [266].

1. У підрозділі 4.1 розроблено формально-геометричну модель розподілу уваги оператора, в межах якої обмежений ресурс уваги подано як нормований векторний розподіл між функціонально значущими каналами інформаційного поля оператора. На цій основі введено формальний опис механізмів перерозподілу уваги та обґрунтовано умови виникнення неповного охоплення навігаційної ситуації як передумови помилки в ергатичному контурі керування. Додатково запропоновано темпоральну модель часових станів операторського циклу на основі марковського підходу, що забезпечує основу для прогнозування дій оператора під час несення навігаційної вахти.

2. У підрозділі 4.2 розроблено моделі, методи та засоби непрямої ідентифікації дисторсії суб’єктивного часу оператора як одного з прихованих

індикаторів дезорганізації операторської діяльності. Показано, що прояви часової дисторсії можуть бути формалізовані через категорії суб'єктивної ентропії, антиципації, індивідуальних часових кодів, часово-поведінкових відхилень і параметрів руху судна. Отримані положення формують методичну основу для подальшої експериментальної перевірки ДЧС у контурі ІСНЗ, наведену в розділі 6.

3. У підрозділі 4.3 побудовано *p*-адичну модель структурної ідентифікації ментально-мотиваційних станів оператора, яка забезпечує перехід від якісно-психологічного опису до формального ієрархічного кодування. Показано, що *p*-адична модель перестає бути лише класифікаційною схемою і набуває властивостей формального інструмента структурної ідентифікації внутрішніх станів оператора, пов'язаних із якістю мотивації, орієнтацією на успіх, готовністю до саморозвитку та пріоритетом навігаційної безпеки. Важливим прикладним результатом цього підрозділу є обґрунтування трирівневої логіки автоматизованого реагування системи безпеки – від інформаційних підказок і підтримки дій оператора до повідомлення вахтового помічника капітана та рекомендації щодо переходу до компенсуючих режимів керування у небезпечних ситуаціях.

4. У підрозділі 4.4 розвинено логіко-геометричні моделі антиципації, мотиваційних екстремумів і поведінкових стратегій оператора в складних навігаційних ситуаціях. На основі представлення траєкторій поведінки у вигляді графа Келі показано, що антиципація і самоочікування можуть бути формально включені до моделі як внутрішні чинники просторово-часової перебудови дій. Експеримент із залученням 54 операторів засвідчив, що граф Келі забезпечує структурне покриття понад 79 % проаналізованих фрагментів поведінкових траєкторій, тобто дає змогу відтворити порядок переходів, повтори, повернення та циклічні елементи стратегій операторів у межах заданої експериментальної вибірки.

5. У підрозділі 4.5 розроблено метод непрямої ідентифікації можливих проявів функціонального виснаження оператора за траєкторіями дій та часовими параметрами взаємодії із засобами навігаційного

забезпечення. Запропонований підхід інтегрує просторові параметри постави, часову структуру операторських дій, повторні звернення до елементів траєкторії, логіку переходів між етапами маневру та планування послідовності керувальних впливів. Отриманий результат має статус непрямої індикаторної оцінки, а його експериментальна перевірка на тренажерних даних і даних спостереження за операторами подана у розділі 6.

6. У підрозділі 4.6 завершено перехід від ідентифікації окремих когнітивних і психофізіологічних проявів до побудови інтегрованої моделі виявлення критичних ситуацій і прогнозування дій оператора в ергатичних системах управління судном. У межах цього підходу формалізовано зв’язок між подібністю поточної ситуації до попереднього досвіду, ознаками її нерозрізнення, емоційним напруженням, *p*-адичною складністю етапу, командною синхронізацією та результативністю дій. Побудовано систему факторів Fs1–Fs9 і Fr1–Fr5, що дозволила сформувати ознакову основу для прогнозування результативності дій оператора на основі дерева рішень CART та визначити логіку рекомендаційного реагування ІСНЗ у критичних або квазікритичних ситуаціях.

7. У сукупності результати розділу 4 дали змогу сформувати цілісний контур ідентифікації та прогнозування стану оператора, в якому увага, часові деформації, ментально-мотиваційні стани, антиципація, втома та ознаки критичних ситуацій розглядаються не ізольовано, а як взаємозумовлені компоненти єдиного процесу управління рухом судна. Саме в цьому полягає головний науковий результат розділу: від фрагментарного опису людського фактора здійснено перехід до системно організованого апарату його формалізації, ідентифікації та прогнозування в ергатичних системах навігаційного забезпечення.

8. Практичне значення результатів розділу 4 полягає в тому, що вони створюють інформаційно-технологічну основу для побудови інтелектуальних засобів діагностики, прогнозування та підтримки рішень у судноводінні [313]. Отримані моделі придатні для застосування в тренажерних і прикладних

сценаріях, на AIS/ECDIS-даних, а також у складі перспективних систем адаптивного управління ризиками людського фактора [181].

Отже, у четвертому розділі створено науково-методологічну основу ідентифікації когнітивних і психофізіологічних станів оператора в процесах управління рухом судна. Розроблені моделі та методи забезпечують перехід від спостереження зовнішніх проявів поведінки оператора до формального опису його операторських станів, від оцінювання окремих індикаторів – до прогнозування ризикових і небезпечних сценаріїв, а від локальної діагностики – до включення результатів у контур підтримки рішень і адаптивного керування.

РОЗДІЛ 5. Методологія інтегрованого управління ризиками людського фактора в ергатичних комплексах навігаційного забезпечення

5.1. Модель *p*-адичної структуризації сприйняття навігаційних ситуацій та прогнозування реакцій оператора за часовими кодами дій

У попередніх розділах дисертації послідовно доведено, що безпека функціонування ергатичних систем навігаційного забезпечення визначається не лише зовнішніми умовами плавання, параметрами руху судна чи складністю навігаційної обстановки, а й характером сприйняття, інтерпретації та часової організації рішень оператора. У розділі 2 сформовано уявлення про інформаційне поле оператора як багатошарову структуру, в якій поєднуються сигнали зовнішнього середовища, дані навігаційних приладів, процедурні обмеження, комунікаційні повідомлення та результати внутрішньої оцінки ситуації. У розділі 3 показано, що цифрові траєкторії руху судна і параметри маневрування можуть бути перетворені на простір ознак, чутливий до латентних проявів людського фактора. У розділі 4 сформовано діагностично-прогностичний контур стану оператора, в якому увага, часові деформації, антиципація, втома та нестійкість когнітивного контролю розглядаються як чинники зміни якості рішень оператора.

За таких вихідних положень у цьому підрозділі розв’язується задача формального опису того, яким чином оператор структурує навігаційну ситуацію, переходить між різними рівнями її деталізації та формує часові коди дій, придатні для подальшого прогнозування його реакцій [248]. На відміну від суто описових підходів, де відмінності між операторами трактуються переважно якісно, тут пропонується модель, в якій індивідуальна логіка сприйняття ситуації подається через *p*-адичні простори, часові переходи між ними та відповідні часові ряди реакцій.

У межах цієї моделі *p*-рівнева структуризація не розглядається як абстрактна числова характеристика кваліфікації оператора, а вводиться як операційний показник рівня дискретизації навігаційної ситуації у процесі її сприйняття та прийняття рішення. Нехай навігаційна ситуація в момент часу *t*

описується нормованим вектором ознак:

$$\mathbf{s}(t)=\begin{pmatrix} CPA(t), TCPA(t), V(t), \psi(t), \dot{\psi}(t), XTE(t), \\ d_{\min}(t), \rho_{traf}(t), I_{COLREG}(t), \Delta t_{react}(t) \end{pmatrix}, \tag{5.1}$$

де $CPA(t)$ – найменша дистанція зближення; $TCPA(t)$ – час до найменшої дистанції зближення; $V(t)$ – швидкість судна; $\psi(t)$ – курс; $\dot{\psi}(t)$ – кутова швидкість зміни курсу; $XTE(t)$ – поперечне відхилення від запланованого маршруту; $d_{\min}$ – мінімальна відстань до навігаційної небезпеки; $\rho_{\text{traf}}(t)$ – локальна щільність трафіку; $I_{\text{COLREG}}(t)$ – індикатор обмежень МПЗЗС; $\Delta t_{\text{react}}(t)$ – часовий інтервал реакції оператора.

Для кожного класу ситуацій S_i задається множина розрізнюваних альтернатив: $\mathcal{A}_i=\{a_{i1}, a_{i2}, ..., a_{ip_i},\}$, а значення $p_i=|\mathcal{A}_i|$ визначає кількість стійко розрізнюваних оператором альтернатив у межах відповідного класу ситуацій. Альтернатива вважається стійко розрізнюваною, якщо вона повторюється у тренажерних або експлуатаційних даних, підтверджується експертною розміткою та має відтворюваний часовий або поведінковий патерн. Тому $p_i = 2$ відповідає бінарній класифікації, $p_i = 3$ – трирівневій лінгвістичній класифікації, а $p_i = 4$ – деталізованій багатофакторній класифікації ситуації.

$$S_i^{(p)}=\{a_{i1}^{(p)}, a_{i2}^{(p)}, ..., a_{ip}^{(p)}\},\ a_{ij}^{(p)}=\varphi_j\left(\mathbf{s}_{nav}(t), \theta_r\right), \tag{5.2}$$

де $S_i^{(p)}$ – опис i-ї навігаційної ситуації у просторі з рівнем дискретизації p; $a_{ij}^{(p)}$ – j-та альтернатива або ознакова категорія у межах цієї ситуації; $\mathbf{s}_{nav}(t)$ – вектор спостережуваних навігаційних, часових і поведінкових ознак; θ_r – індивідуальний профіль оператора або групи операторів; φ_j – правило віднесення поточного стану до відповідної альтернативи.

$$S_{i,t+1}^{(p)}=T_p\left(S_{i,t}^{(p)}, \mathbf{u}(t), \mathbf{s}_{nav}(t), \theta_r\right)+\varepsilon_t, \tag{5.3}$$

де $T_p(\cdot)$ – оператор переходу між станами сприйняття у просторі p-рівневої класифікації; $\mathbf{u}(t)$ – вектор керувальних дій оператора; $\mathbf{s}_{\text{nav}}(t)$ – поточний вектор навігаційних ознак; θ_r – індивідуальний профіль реакцій оператора; ε_t –

випадкова складова, що враховує невимірювані фактори, похибки спостереження та ситуаційну невизначеність.

Отже, формула (5.3) визначає формальний оператор переходу між дискретизованими станами сприйняття, який може бути ідентифікований за даними ECDIS, журнальними файлами, тренажерними сценаріями, відеоспостереженням та експертною розміткою.

Залежно від рівня оператора змінюється його *p*-адичність. У межах запропонованої моделі для частини кадетів-стажерів може бути характерною переважно бінарна схема класифікації, умовно позначена як $p = 2$. За такої схеми оператор розрізняє альтернативи: «так» – «ні»; «існує» – «не існує»; «значуще» – «не значуще» тощо. Своєю чергою, у частини третіх і других помічників капітана може формуватися трирівнева схема класифікації, умовно позначена як $p = 3$, у вигляді: «слабкий» – «середній» – «сильний»; «ігнорувати» – «утримувати увагу» – «фіксувати»; «не включати в розрахунок» – «запасний варіант» – «основний варіант» тощо. Для старших помічників капітана і капітанів, залежно від професійного досвіду та типу ситуації, кількість стійко розрізнюваних категорій може зростати до $p \geq 4$. При цьому виникає питання: яким чином відбувається еволюція прийняття рішень під час переходів від найменшої *p*-адичності до більшої в операторів електронної морської навігації?

Очевидно, що відбувається успадкування класифікації – кодування, тобто оператор, переходячи, наприклад, від $p = 2$ до $p = 3$, додає лінгвістичну змінну до вже прийнятої системи ідентифікації вхідних інформаційних сигналів. Це абсолютно природний процес, враховуючи, що знання розширюються послідовно, а психіка не зазнає кардинальних змін протягом життя [194, 251].

Можна припустити, що в такому випадку логічним буде твердження, що в системі $p = 2$: «так» – «ні» із високою ймовірністю при $p = 3$ з'явиться: «так» – «не знаю» – «ні» та ін.

Отже, постає завдання визначення траєкторій індивідуального розвитку

сприйняття ситуацій операторами електронної морської навігації під час переходу до рівня $p = n+1$.

Також необхідно врахувати, що p-адичність операторів щодо повного спектра навігаційних ситуацій еволюціонує нерівномірно, оскільки залежить не стільки від кваліфікації, скільки від частоти виникнення типових ситуацій. Своєю чергою, в ряді випадків ситуація, з огляду на свою простоту, може не вимагати високої p-адичності незважаючи на досвід капітана, що може бути зумовлено прагненням зменшити когнітивне навантаження та зберегти доступні ресурси уваги. Відтак карта психічних станів щодо спектра навігаційних ситуацій неоднорідна та має різну глибину ієрархічного подання [69].

Для уникнення змішування власне p-адичної метрики з графовою моделлю прийняття рішень надалі використовується не числова метрика p-адичних чисел у строгому алгебраїчному сенсі, а деревоподібна графова інтерпретація p-рівневої класифікації ситуації.

Нехай $G_p = (V_p, E_p)$ – орієнтований граф сприйняття навігаційної ситуації при рівні дискретизації p, де V_p – множина вузлів-категорій, а E_p – множина допустимих переходів між ними. Нехай перехід від p до $p+1$ означає деталізацію ситуації, а перехід від p до $p-1$ – її узагальнення або спрощення.

З цього випливає, що під час побудови деревоподібної ієрархічної структури існує залежність: збільшення p-адичності призводить до підвищення деталізації, а зменшення – до узагальнення.

$$p_{t+1} = \begin{cases} p_t + 1, & R(t) \geq R\uparrow \wedge C(t) \geq C\uparrow \wedge B(t) < B_{\max}, \\ p_t - 1, & B(t) \geq B_{\max} \vee \Delta t_{react}(t) > \Delta t_{\max}, \\ p_t, & \text{в інших випадках}, \end{cases} \tag{5.3a}$$

де $R(t)$ – інтегральний рівень навігаційного ризику; $C(t)$ – складність ситуації; $B(t)$ – когнітивне навантаження оператора; $R\uparrow$, $C\uparrow$, $B_{\max}$, $\Delta t_{\max}$ – порогові значення, визначені за тренажерними даними, експертною розміткою або статистичною калібровкою.

Для переходів між графами різної деталізації вводиться відображення

$$\Pi_{p\to q} : G_p \to G_q,\ q \in \{p-1, p, p+1\}. \tag{5.4}$$

Якщо $q = p+1$, відображення $\Pi_{p\to p+1}$ виконує деталізацію вузла; якщо $q = p-1$ відображення $\Pi_{p\to p-1}$ виконує агрегування кількох вузлів у ширшу категорію. Баланс між необхідною деталізацією ситуації та ресурсними можливостями оператора задається умовою:

$$J_{\text{det}}(t) = \omega_R R(t) + \omega_C C(t) - \omega_B B(t) - \omega_T \Delta t_{react}(t) \tag{5.5}$$

де $J_{\text{det}}(t)$ – інтегральний показник доцільності підвищення рівня деталізації; ω_R, ω_C, ω_B, ω_T – вагові коефіцієнти, що визначають відносний внесок ризику, складності, навантаження та часової затримки.

Тоді вибір рівня p може бути поданий як задача:

$$p^*(t) = \arg\max_{p\in P}\left[Q_p(t) - \lambda C_p(t)\right], \tag{5.6}$$

де $Q_p(t)$ – очікувана якість ідентифікації ситуації при рівні p, $C_p(t)$ – когнітивна або часова вартість використання цього рівня деталізації, λ – коефіцієнт штрафу за надмірну складність.

Як теоретичний прототип ієрархічної близькості використовується p-адична метрика: $\rho_p(x,y) = |x-y|_p, x \to |x|_p$. У запропонованій моделі ця метрика використовується як основа для деревоподібної інтерпретації близькості станів. Рівень p використовується як операційний показник деталізації сприйняття навігаційної ситуації. Особливо це актуально під час прийняття рішень та в умовах навігаційної небезпеки, яку ідентифікують як критичну ситуацію. Складність ситуації вимагає від оператора відповідного рівня сприйняття, кожному з яких можна поставити у відповідність метричний простір (X, ρ_x) або (Y, ρ_y). Так, наприклад, прийняття рішень в бінарній логіці ($p = 2$) найбільше відповідає простим завданням, що вимагають увімкнення або вимкнення уваги оператора за заданими ознаками.

Зі свого боку, перехід від p=2 до p=3 доцільно розглядати не як просте «перенесення» задачі на вищий рівень, а як операцію деталізації простору сприйняття, за якої бінарна схема прийняття рішення доповнюється

проміжною лінгвістичною категорією. Нехай простір X_2 відповідає бінарній класифікації ситуації: $X_2 = \{x_0, x_1\}$, де x_0 означає відсутність необхідності в активній реакції, а x_1 – необхідність реакції або зміни режиму уваги. Тоді простір Y_3 задає трирівневу класифікацію: $Y_3 = \{y_0, y_1, y_2\}$, де y_0 відповідає штатному стану, y_1 – проміжному стану невизначеності, уточнення або підвищеного контролю, а y_2 – стану, що потребує активної реакції.

Перехід від X_2 до Y_3 можна подати як вкладення бінарного простору в трирівневий простір:

$$\iota_{2\to 3} : X_2 \to Y_3,\ \iota_{2\to 3}(x_0) = y_0,\ \iota_{2\to 3}(x_1) = y_2. \tag{5.7}$$

У скороченому індексному вигляді це саме вкладення має форму:

$$\iota_{2\to 3}(x_k) = y_{2k},\ k \in \{0,1\}. \tag{5.8}$$

Отже, трирівневий простір містить образ бінарного простору та додаткову проміжну категорію: $Y_3 = \iota_{2\to 3}(X_2) \cup \{y_1\},\ y_1 \notin \iota_{2\to 3}(X_2)$.

Це означає, що простір Y_3 не заперечує простір X_2, а уточнює його шляхом введення додаткової категорії y_1, яка в бінарній логіці не має самостійного представлення. Якщо необхідно повернутися від трирівневої класифікації до бінарної, застосовується проєкція $\pi_{3\to 2} : Y_3 \to X_2$, яка може задаватися одним із двох правил залежно від політики безпеки:

$$\begin{aligned} \pi^{(c)}_{3\to 2}(y_j) &= \begin{cases} x_0, & j = 0, \\ x_1, & j = 1,2, \end{cases} \\ \pi^{(m)}_{3\to 2}(y_j) &= \begin{cases} x_0, & j = 0,1, \\ x_1, & j = 2, \end{cases} \end{aligned} \tag{5.9}$$

де $\pi^{(c)}_{3\to 2}$ – консервативна проєкція, за якої проміжний стан y_1 уже трактується як підстава для підвищеної реакції; $\pi^{(m)}_{3\to 2}$ – помірна проєкція, за якої проміжний стан ще не переводиться в активне втручання, але потребує уточнення.

Принципова відмінність між просторами полягає в тому, що для крайніх станів інформація зберігається: $\pi_{3\to 2} \circ \iota_{2\to 3} = \mathrm{Id}_{X_2}$, але для всього простору Y_3

зворотне відображення не є тотожним: $\iota_{3\to 2} \circ \pi_{2\to 3} \neq \mathrm{Id}_{Y_3}$.

Це означає, що під час переходу від Y_3 до X_2 проміжна категорія y_1 втрачається або примусово приєднується до одного з крайніх класів. Саме тому бінарна модель X_2 є придатною для простих ситуацій типу «реагувати / не реагувати», але недостатньою для тих навігаційних ситуацій, де необхідно відокремити штатний стан, стан невизначеності та стан активного ризику.

У предметній області судноводіння це відповідає переходу від логіки:

«*безпечно*» / «*небезпечно*»,

до логіки: «*безпечно*» / «*потребує уточнення*» / «*небезпечно*».

Тому формула (5.7) показує, що простір X_2 є грубішою проєкцією простору Y_3. Якщо рішення залежить від проміжного стану y_1, то бінарна модель втрачає частину інформації, необхідної для адекватного розпізнавання навігаційної ситуації.

Таким чином, метричні простори, які визначаються рівнем p-адичності, можуть бути представлені у вигляді графів [94]. Для підтвердження гіпотези дослідження розглянемо рівні сприйняття критичної навігаційної ситуації в рамках $p = 2$, $p = 3$, $p = 4$ – адичності на прикладі завдання перетину ліній поділу в Сінгапурській протоці [347] (рис. 5.1).

За допомогою модуля прогнозування на рисунку часових траєкторій суден в системі TRANSAS Navi-Trainer Professional 5000 можна чітко виділити дві групи I та II, які відрізняються між собою за прийнятими рішеннями. При цьому група I рухається курсом, приблизно паралельним лініям поділу руху, група II відхилилася від групи I на 31º–33º.

Отже, можна зробити висновок, що на прийняття рішень групою суден I та II впливали різні набори інформаційних сигналів. І відповідно група I та II оцінювали навігаційну ситуацію в різних системах p-адичності, формуючи простори X та Y, такі, що: $X \subset Y \mid Y \setminus X \neq \varnothing$.

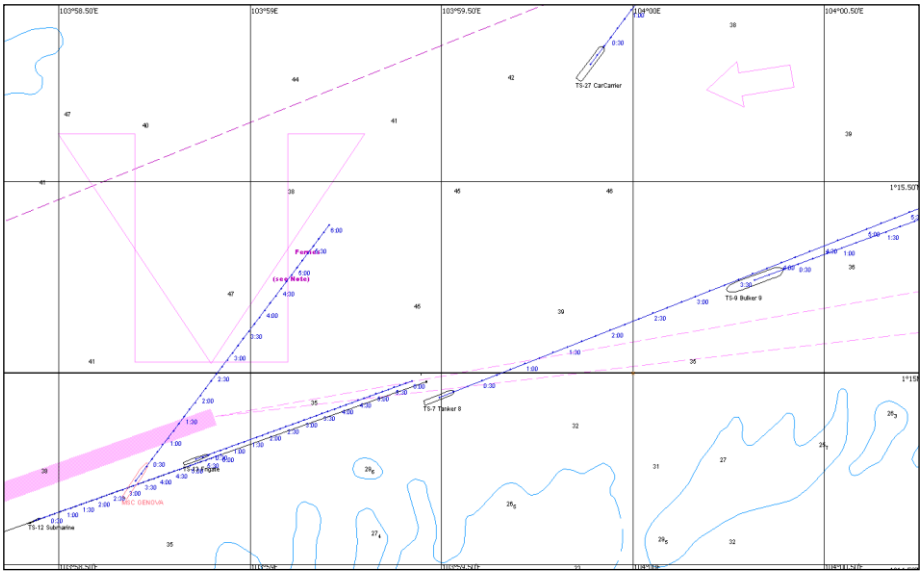


Рисунок 5.1. Початок маневру перетину ліній поділу в Сінгапурській протоці

Для порівняння двох систем сприйняття побудуємо граф, який відображає ієрархічний зв’язок між просторами *X* та *Y* (рис. 5.2).

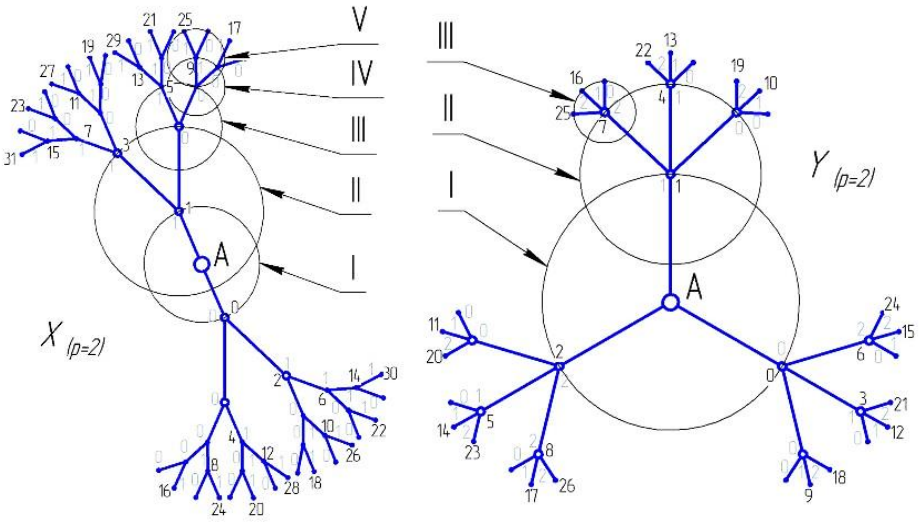


Рисунок 5.2. Простори ідентифікації навігаційної ситуації *X* та *Y*

Розглядаючи графи *X* та *Y*, можна прийти до висновку, що, наприклад, для ідентифікації навігаційної ситуації №25 у просторі $X_{(p=2)}$, потрібно пройти 5 етапів, визначаючи значення 5 параметрів відповідно у бінарному кодуванні. Для ідентифікації тієї ж ситуації, але в просторі $Y_{(p=3)}$, необхідно вже три етапи з трирівневою системою кодування. Однак слід врахувати, що чим нижча *p*-адичність, тим грубішими будуть результати прийняття рішень. У результаті можна порівняти два підходи до прокладання маршруту руху судна (рис. 5.3).



а *б*

Рисунок 5.3. Приклади відображення навігаційної інформації в ECDIS

У випадку, наведеному на рис. 5.3а, оператор приймає рішення у просторі $X_{(p=2)}$, не беручи до уваги параметр безпечної глибини, а діючи за принципом: «безпечна для проходження» або «небезпечна для проходження». Своєю чергою, оператор, який приймає рішення у просторі $Y_{(p=3)}$ має іншу класифікацію водної поверхні: «мілководдя», «безпечна глибина», «відкрите море/океан». При цьому в $Y_{(p=3)}$ вже характерні значення глибини в метрах і знання осадки судна для визначення меж кожної лінгвістичної змінної. Основна небезпека наведеного прикладу полягає не в тому, що оператор приймає рішення в межах простору $X_{(p=2)}$, а в тому, що цей простір не підходить для цієї задачі.

У межах аналізованої тренажерної вибірки було виявлено, що частина операторів демонструвала стійку тенденцію до використання спрощеної схеми ідентифікації ситуації навіть у тих сценаріях, де експертна модель передбачала необхідність більш деталізованого розрізнення ознак. Частка таких випадків у відповідному наборі спостережень становила близько 32%. Це значення не слід трактувати як універсальну статистичну закономірність для всієї сукупності операторів; воно характеризує емпірично зафіксовану тенденцію в межах конкретного тренажерного сценарію, складу учасників і прийнятих критеріїв експертної розмітки.

Критерієм віднесення дії оператора до спрощеного простору X було використання бінарної схеми вибору без урахування проміжних або додаткових ознак, наявних у сценарії [348]. Верифікація здійснювалася

шляхом зіставлення траєкторії дій, часу реакції, журналів ECDIS та експертної розмітки інструкторів.

$$H_s(t) = -\sum_{a \in A_s} \hat{p}_a(t) \ln \hat{p}_a(t), \tag{5.10}$$

де H_s – множина допустимих альтернатив дії у ситуації s; $\hat{p}_a(t)$ – оцінена ймовірність вибору альтернативи a у момент часу t.

Ймовірність $\hat{p}_a(t)$ оцінюється у ковзному часовому вікні:

$$\hat{p}_a(t) = \frac{n_a(t) + \alpha}{\sum_{b \in \mathcal{A}_s} \left(n_b(t) + \alpha \right)}, \tag{5.11}$$

де $n_a(t)$ – кількість виборів альтернативи a у відповідному часовому вікні; $\alpha > 0$ – параметр згладжування, який запобігає нульовим імовірностям.

Для порівняння ситуацій з різною кількістю альтернатив використовується нормована ентропія:

$$\bar{H}_s(t) = \frac{H_s(t)}{\ln |\mathcal{A}_s|}, \; 0 \le \bar{H}_s(t) \le 1, \tag{5.12}$$

де $|\mathcal{A}_s|$ – кількість допустимих альтернатив у ситуації s.

Значення $\bar{H}_s(t)$ близьке до нуля, відповідає стійкому вибору однієї домінуючої альтернативи, тоді як значення, близьке до одиниці, свідчить про невизначеність, коливання між альтернативами або втрату стійкої стратегії дій.

Низьке значення $\bar{H}_s(t)$ може відповідати як упевненому стійкому вибору, так і надмірно ригідній або спрощеній стратегії. Високе значення може відображати як адаптивний пошук альтернатив, так і нестійкість у прийнятті рішень. Тому ентропію необхідно інтерпретувати разом із рівнем навігаційного ризику, часом реакції та показниками керувальної діяльності оператора.

За умови рівномірного поділу простору альтернатив відносна ширина однієї категорії може бути умовно подана як: $\zeta_{2\ldots n} = \left(\frac{1}{2}; \frac{1}{3}; \frac{1}{4}, \ldots, \frac{1}{n} \right)$. Чим точніше і багатопараметричніше рішення потрібно прийняти оператору, тим

вищою має бути *p*-адичність. Однак слід врахувати, що раніше визначений баланс між необхідною деталізацією та доступними когнітивними ресурсами. Послідовність прийнятих рішень оператором у визначений дискретний момент часу може на кожному етапі спиратися на ту *p*-адичність, яка з одного боку призведе до бажаних результатів, а з іншого – до збереження сил і емоційної енергії.

Таким чином, очевидно, що оператор буде спочатку планувати переходи у *p*-адичності на оглядну відстань ланцюга послідовних дій. Для кожного відрізка, як показали дослідження, характерні відповідні психічні стани та напрями антиципації. Виходячи із зазначеного, доцільно подати імітаційну схему прийняття рішень оператором під час критичної навігаційної ситуації з використанням тривимірної моделі графів просторів $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ і $Z_{(p=4)}$. Як видно з рисунка 5.4, просторова модель передбачає поєднання трьох просторів-площин у вигляді графів для відображення інтелектуальної діяльності оператора у вигляді траєкторій розмірності відповідно до обраної *p*-адичності.

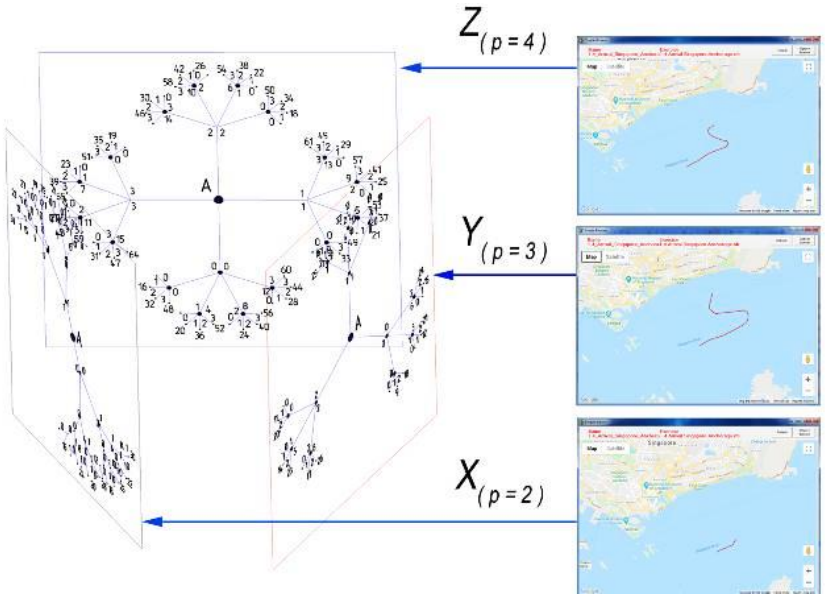


Рисунок 5.4. Просторова модель інтелектуальної діяльності оператора

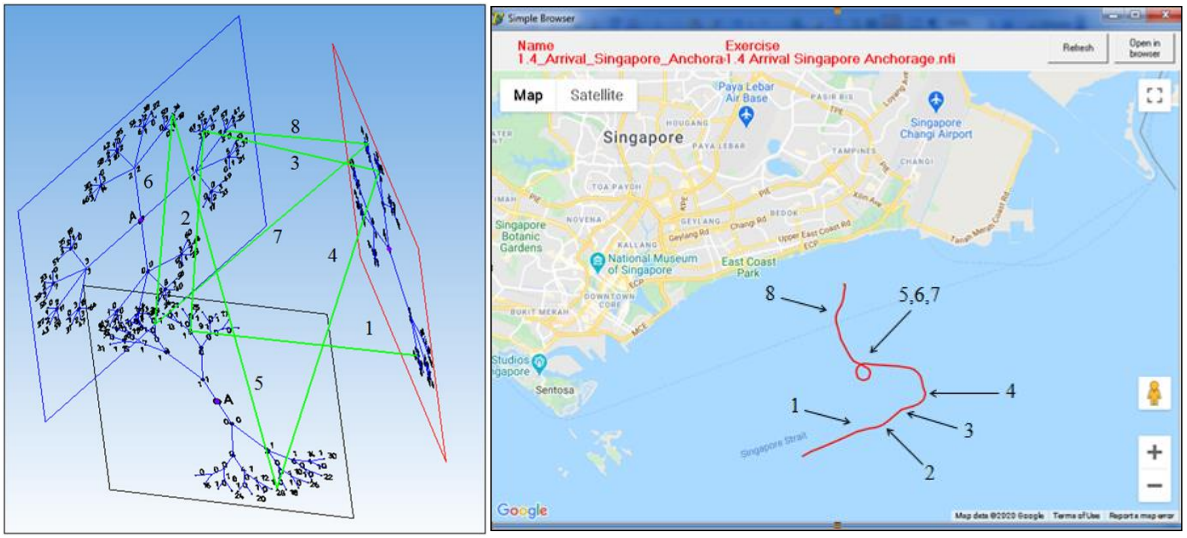
Побудуємо траєкторію інтелектуальної діяльності оператора під час виконання складних маневрів. Реєстрація та аналіз розподілу уваги операторів, автоматизований аналіз електронних бортових журналів, а також

психологічні методики дозволили визначити часові ряди і траєкторії їх реакцій (рис. 5.5).

Для побудови часових рядів можуть використовуватися дані реєстрації уваги, електронних журналів, тренажерних сценаріїв та експертної розмітки, в яких за допомогою засобів реєстрації напрямку погляду та фіксацій уваги операторів були ідентифіковані часові проміжки між просторами $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ і $Z_{(p=4)}$.

Вимірювання часу на перехід від однієї системи сприйняття ситуації до іншої дало можливість оцінити, наскільки стійкою є сформована оператором послідовність дій. Залежно від фіксацій і переведень уваги оператора на конкретні джерела навігаційної інформації з'явилась можливість апроксимувати ці дані у вигляді об'єктів того чи іншого *p*-адичного простору. Так, наприклад, фрагмент послідовності дій оператора на етапі оцінки ситуації при наближенні до порту включає: аналіз даних ECDIS ($Y^{t1}{}_{(p=3)}$); візуальне спостереження, одна ціль ($X^{t2}{}_{(p=2)}$); аналіз даних ECDIS ($Y^{t3}{}_{(p=3)}$); візуальне спостереження, багато цілей, показники приладів ($Z^{t4}{}_{(p=4)}$). Аналіз таких даних дає змогу визначати моменти часу, в яких під час виконання маневру на маршруті відбувається перехід з одного простору сприйняття в інший. Проаналізувавши типові траєкторії маневрів у однакових навігаційних і погодних умовах, це дало змогу виділити ланцюги подій, які формують сприйняття ситуації в часових рамках (рис. 5.5 а, б).

Аналіз траєкторій, а також час, витрачений на переходи, дають можливість визначити, на яких етапах оператор використовує той чи інший простір сприйняття навігаційної ситуації.



а) переходи між просторами сприйняття

б) точки переходів на карті

Рисунок 5.5. Ланцюги подій на траєкторії маневру судна

Залучення досвідчених морських капітанів як експертів дозволило точно визначити на якому відрізку траєкторії доцільно застосовувати простір $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ або $Z_{(p=4)}$.

Однак цього недостатньо для прогнозування можливих критичних ситуацій для кожного оператора. Як показали експерименти, у кожного оператора є власний план очікуваних дій і власна послідовність переходів до необхідних для ідентифікації ситуацій у просторах сприйняття. Це накладає як невизначеність, так і складність в побудові прогностичних моделей. Отже, експертна оцінка і прийняті експертно-задані моделі реакцій, рекомендовані експертами, не забезпечують повного розв'язання поставленої задачі і вимагають принципово іншого підходу.

Враховуючи зазначені обставини, у підрозділі запропоновано індивідуально орієнтований підхід до аналізу та прогнозування реакцій оператора за допомогою часових відрізків або часових кодів переходів між просторами сприйняття. У межах Розділу 5 цей підхід розглядається як методологічна основа для подальшого керувального реагування на ризикові прояви людського фактора. Його експериментальна реалізація на часових

рядах, тренажерних даних, log-файлах ECDIS та процедурах МАІКС подана у розділі 6.

5.2. Методи ранньої ідентифікації втрати керованості судна та автоматизованого аварійного розходження в зонах підвищеного навігаційного ризику

У попередніх підрозділах дисертації було обґрунтовано, що людський фактор у системах навігаційного забезпечення має розглядатися не як зовнішня та випадкова причина аварійності, а як внутрішній динамічний компонент ергатичної системи, який визначає якість обробки інформаційного поля, часову організацію рішень, стійкість керувальних дій і межі допустимого розподілу функцій між оператором та автоматизованими засобами. Якщо в підрозділі 5.1 було показано, що стан оператора може бути опосередковано поданий через часові коди переходів між просторами сприйняття, то в цьому підрозділі ця логіка доводиться до рівня прикладних методів ранньої ідентифікації втрати керованості судна та механізмів автоматизованого аварійного розходження в умовах підвищеного навігаційного ризику.

Людський фактор є одним із ключових чинників зіткнень, посадок на мілину та втрати стійкості маневрування, особливо в районах інтенсивного судноплавства, у вузьких проходах, обмежених акваторіях і за несприятливих погодних умов [85]. Попереднє планування маршруту на основі ECDIS саме по собі не гарантує безпечного проходження, оскільки в реальній ергатичній системі судноводіння рішення постійно коригуються під впливом зустрічного та перехресного трафіку, випадкових перешкод, обмеженої видимості, вітрових і хвильових збурень, а також індивідуальних особливостей навігаційної вахти. У такому контексті втрата керованості повинна трактуватися не лише як кінцевий аварійний результат, а й як процес поступового переходу системи до передкритичного режиму [195], коли поведінкові ознаки та показники керувальної діяльності вже свідчать про деградацію контуру «оператор–судно» та зниження стійкості керувальної

діяльності, хоча траєкторія судна ще не вийшла за межі фізично допустимого коридору.

У межах цього підрозділу керованість судном розглядається як здатність ергатичної системи підтримувати цілеспрямовану, безпечну та процедурно узгоджену динаміку руху в умовах змінного інформаційного навантаження. Відповідно, втрата керованості означає такий стан системи, за якого оператор більше не забезпечує достатньої стабільності керувальних дій, а наявні часові та інформаційні ресурси не гарантують своєчасного виходу з небезпечної ситуації без зовнішньої підтримки. З методологічної точки зору це означає, що задача підрозділу полягає не в післяаварійному поясненні помилки, а в побудові процедур раннього розпізнавання переходу до ризикового режиму та визначенні моменту, коли контур автоматизованого втручання має бути активовано [183, 214].

Відповідно до поставленої мети в підрозділі вирішуються такі взаємопов’язані задачі: автоматизоване виявлення та картографічне відображення зон підвищеного навігаційного ризику; визначення часових інтервалів зниження контролю за рухом судна, пов’язаних із індивідуально стабільними реакціями операторів і складністю конкретної локації; математичне моделювання прояву людського фактора під час реалізації автоматизованого коригувального впливу; а також побудова алгоритмів надзвичайного переходу до автоматизованого режиму керування для ухилення від суден-цілей та інших навігаційних перешкод у критичних ситуаціях [182, 187, 191, 196, 200]. Саме така постановка відповідає загальній логіці дисертації, у межах якої Розділ 5 формує методологію ризик-орієнтованого керувального реагування, а Розділ 6 забезпечує експериментальну перевірку працездатності відповідних моделей, методів та процедур адаптивного управління в контурі навігаційного забезпечення.

Згідно зі статистикою, зіткнення з найтяжчими наслідками відбуваються у протоках і фарватерах в умовах обмеженої видимості або вночі, що пояснюється перевищенням швидкості та підвищеною складністю

спостереження, особливо це стосується районів інтенсивного судноплавства [71, 209, 349].

Для більш детального розгляду процесу проходження проток використано тренажерно-сценарні дані, отримані в середовищі NTPRO 5000, у сценарному дослідженні взяли участь 247 операторів. Учасники виконували завдання з проходження Гонконзької та Босфорської проток в умовах інтенсивного руху та численних відхилень при нормальній видимості. У результаті аналіз дав змогу поділити акваторію проходження на зони низької, середньої та високої складності. Аналіз показав, що найскладнішими ділянками є проходження під мостами та маневрування в вузьких місцях.

Для уникнення довільного картографічного поділу небезпечних зон використовується формалізована процедура просторової агрегації аварійних і передаварійних подій. Нехай Ω – досліджувана акваторія, а $\{x_i\}_{i=1}^{N}$ – множина просторових точок, у яких зафіксовано зіткнення, небезпечне зближення або порушення безпечного коридору руху [350]. Для кожної точки $x \in \Omega$ визначається локальна щільність подій:

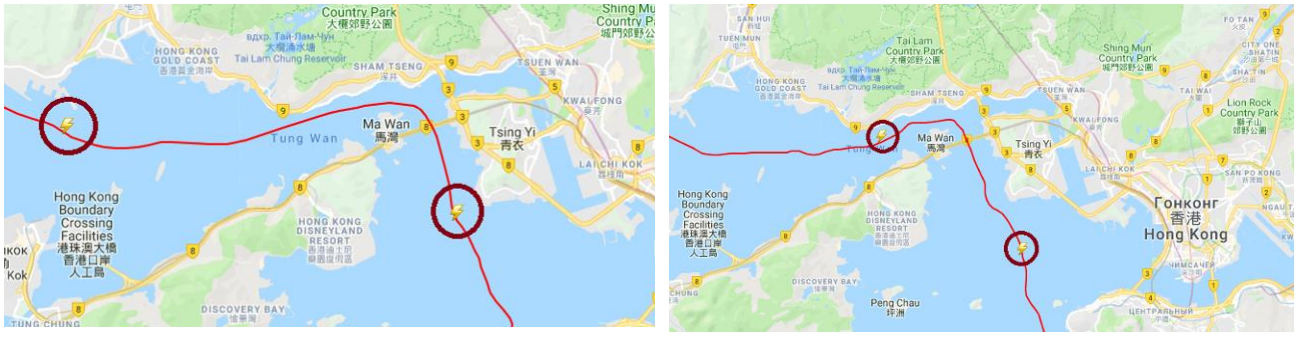
$$\rho(x) = \sum_{i=1}^{N} K_h\left(d\left(x, x_i\right)\right), \tag{5.13}$$

де $d(x, x_i)$ – геодезична відстань між точками; $K_h(\cdot)$ – ядрова функція згладжування з параметром ширини h. На основі значення $\rho(x)$ акваторія поділяється на зони низького, середнього та високого ризику:

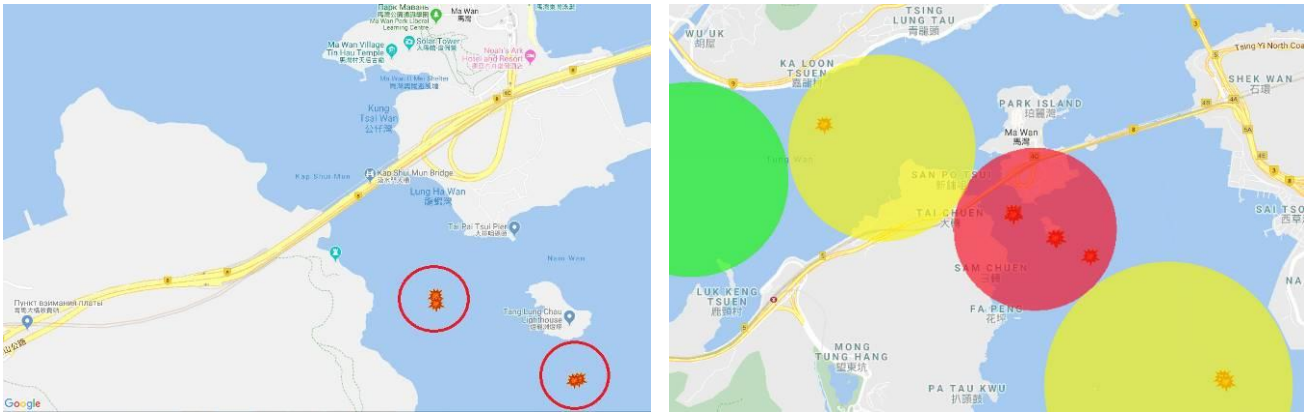
$$\begin{aligned} Z_{low} &= \{x : \rho(x) < \tau_1\}, \\ Z_{mid} &= \{x : \tau_1 \le \rho(x) < \tau_2\}, \\ Z_{higt} &= \{x : \rho(x) \ge \tau_2\}. \end{aligned} \tag{5.14}$$

Порогові значення τ_1 і τ_2 визначаються не в міліметрах на зображенні, а у фізичних одиницях карти – метрах або морських милях – з урахуванням масштабу картографічного шару, щільності трафіку, гідрографічних обмежень і статистичного розподілу аварійних подій.

Під час аналізу аварій у Гонконгській протоці чітко виділялися області поблизу вузьких місць острова Ма-Ван (рис. 5.6).



а) Траєкторії маршрутів з позначеними зіткненнями



б) Визначення місць зіткнень в) Розподіл на зони складності

Рисунок 5.6. Визначення небезпечних зон для проходження Гонконгської протоки

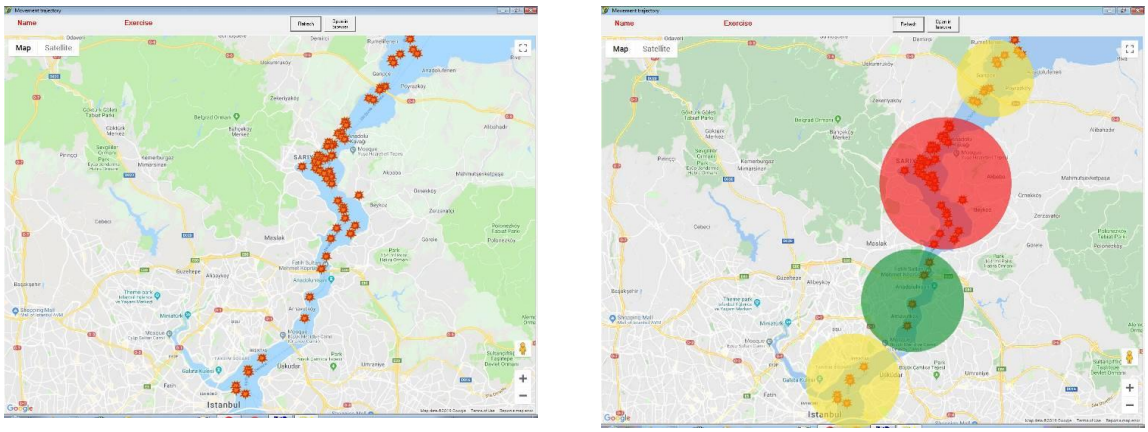
Також проаналізовано маршрути руху суден у Босфорській протоці (рис. 5.7 а). На рис. 5.7б акваторію Босфорської протоки поділено.

Класифікація зон складності виконувалася не за графічною відстанню на рисунку, а за фізичним радіусом аналізу r_{NM}, заданим у морських милях. Для кожної точки акваторії визначалася кількість аварійних або передаварійних подій у межах цього радіуса. Відстань між точками розраховувалася у морських милях з урахуванням співвідношення 1 морська миля = 1852 м. Якщо радіус попередньо визначався за масштабом карти, його перерахунок здійснювався за формулою:

$$r_{NM} = \frac{l_{map} \cdot M}{1852000}, \tag{5.14}$$

де l_{map} – відстань на карті в міліметрах; M – знаменник масштабу карти 1:M. Ділянки, у межах яких фіксувалося до двох небезпечних подій, відносилися до

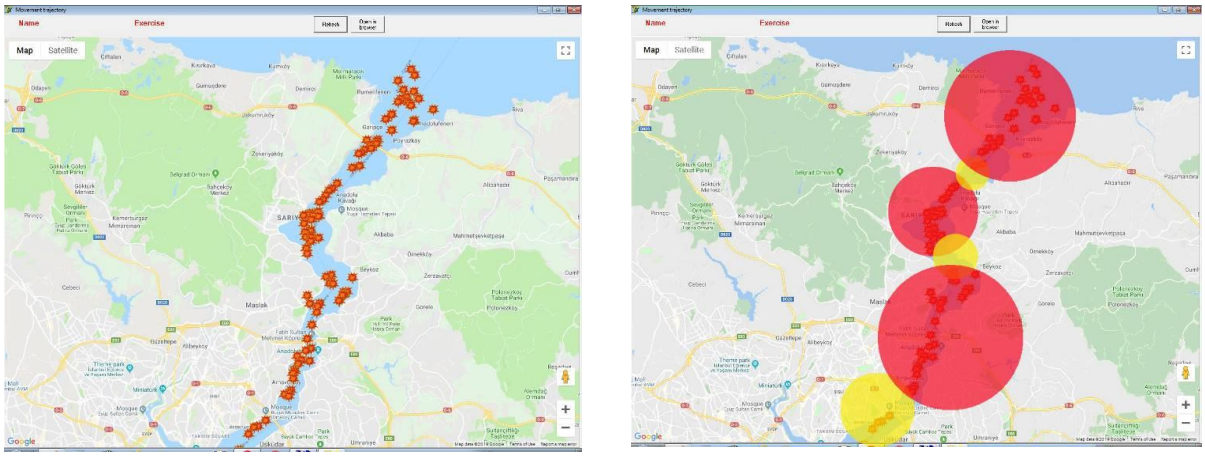
зон низької складності; від трьох до п’яти подій – до зон середньої складності; більше п’яти подій – до зон високої складності. Такий підхід забезпечує навігаційно коректну інтерпретацію результатів, оскільки всі просторові пороги задаються у морських милях, а не в умовних розмірах на зображенні.



а) Визначення місць зіткнень б) Розподіл на зони складності

Рисунок 5.7. Визначення небезпечних зон для проходження Босфорської протоки в умовах інтенсивного руху.

В окремому сценарії умови проходження було змінено: видимість обмежено, а інтенсивність руху знижено на 32 % (рис. 5.8).



а) Визначення місць зіткнень б) Розподіл на зони складності

Рисунок 5.8. Визначення небезпечних зон для проходження Босфорської протоки в умовах обмеженої видимості та зниженої інтенсивності трафіку

У межах розглянутого сценарного прикладу було зафіксовано збільшення площі складної зони з 37% до 83%.

Отриманий результат свідчить, що в межах даного тренажерного сценарію поєднання обмеженої видимості зі зміненою інтенсивністю трафіку супроводжувалося істотним зростанням площі складної зони. Водночас цей результат не дає змогу повністю відокремити внесок видимості від внеску інтенсивності трафіку, оскільки обидва фактори змінювалися в межах одного сценарного переходу. Для строгого кількісного оцінювання окремого впливу кожного фактора доцільним є використання факторного плану 2×2:

видимість ∈ {*нормальна, обмежена*}, трафік ∈ {*високий, знижений*}.

Такий план дає змогу окремо оцінити головний ефект видимості, головний ефект інтенсивності трафіку та їхню взаємодію.

Виникає необхідність у своєчасній ідентифікації моменту втрати контролю за рухом судна [128]. Для цього потрібно чітко виокремити та класифікувати фактори, які найчастіше призводять до помилок у судноплавстві. Серед численних помилок, які допускаються капітанами, чітко простежується тенденція до їх повторюваності, що дає змогу класифікувати основні типи помилок за категоріями: багатофакторність ситуації, хибна ідентифікація, стрес, втома [112]. З урахуванням цієї класифікації, з'являється можливість створення інформаційної системи моніторингу ознак нестійкого керування та підтримки прийняття рішень оператором, яка допоможе своєчасно ідентифікувати момент втрати контролю за рухом судна за допомогою аналізу параметрів керувальної діяльності, приклади часової динаміки яких наведено на рис. 5.9 і 5.10. Для формальної ідентифікації моменту втрати керованості судна використовується вектор ознак нестійкого керування:

$$\mathbf{q}(t)=\begin{pmatrix} |\dot{\psi}(t)|,|\ddot{\psi}(t)|,|\dot{V}(t)|,|\delta_r(t)|,|\dot{\delta}_r(t)|,|XTE(t)|, \\ g_C\left(CPA(t)\right),g_T\left(TCPA(t)\right),g_d\left(d_{\min}(t)\right),I_{COLREG}(t) \end{pmatrix}^{\mathsf{T}}, \qquad (5.15)$$

$$g_C(CPA) = \frac{1}{CPA + \varepsilon_C},\ g_d(d_{\min}) = \frac{1}{d_{\min} + \varepsilon_d}, \tag{5.16}$$

$$g_T(TCPA) = \begin{cases} (TCPA + \varepsilon_T)^{-1}, & TCPA > 0, \\ 0, & TCPA \le 0. \end{cases} \tag{5.17}$$

де $\delta_r(t)$ – кут перекладки руля; $\dot{\delta}(t)$ – швидкість зміни положення руля; інші змінні характеризують просторову, часову та нормативну небезпеку ситуації; $\varepsilon_C > 0$, $\varepsilon_T > 0$ та $\varepsilon_d > 0$ – малі стабілізаційні параметри, що запобігають діленню на нуль.

Інтегральний показник ризику втрати керованості визначається як:

$$R_{LC}(t) = \sigma\left(\beta_0 + \beta^T \bar{\mathbf{q}}_w(t)\right), \tag{5.18}$$

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

Втручання МАІКС активується за правилом $R_{LC}(t) \ge \tau_{LC}$, де поріг τ_{LC} визначається за ROC-аналізом, PR-кривою або шляхом мінімізації вартості помилок першого й другого роду [351, 352].

Для ідентифікації моменту втрати контролю було розроблено програмно-апаратний модуль, що дає змогу відстежувати такі параметри керування, як швидкість судна, кут перекладання руля та швидкість його зміни. Ознакою передкритичного режиму може бути серія частих різноспрямованих перекладань руля протягом короткого інтервалу часу. Така динаміка може свідчити про нестійкість прийняття рішення та стратегії маневру щодо розходження з перешкодами [198]. На рис. 5.9 і 5.10 наведено графіки, що вказують на явну втрату контролю над ситуацією з боку капітана протягом 69 секунд.

Інформація з усіх модулів накопичується в єдиній базі даних, а потім оброблятися центральною системою, яка відповідає за прийняття певних рішень, спрямованих на надання допомоги капітану [110].

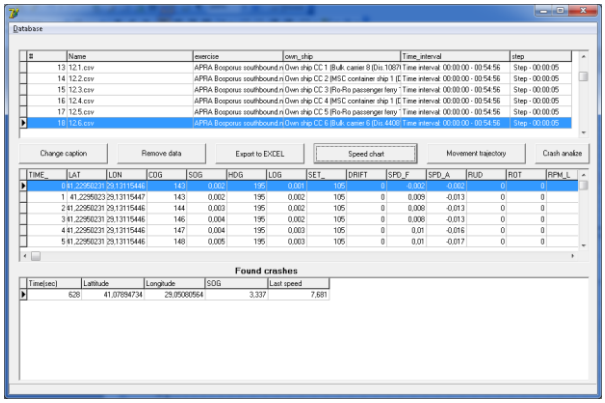


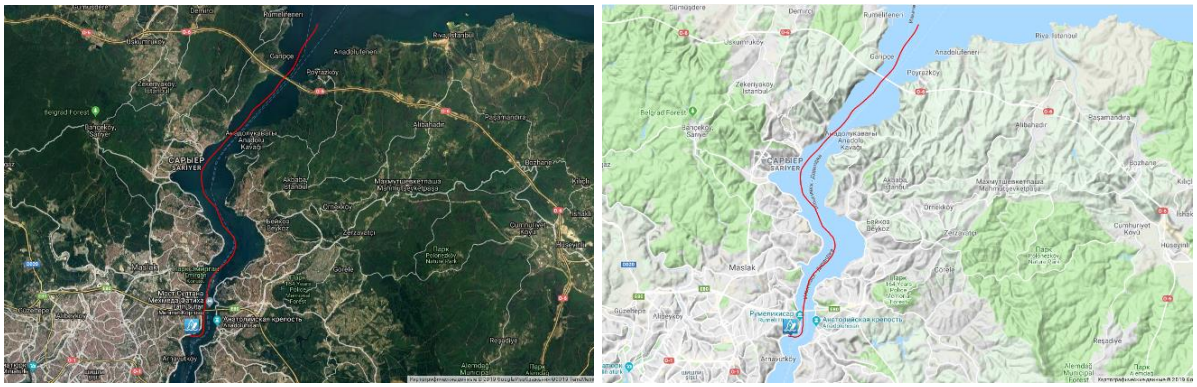
Рисунок 5.9

Динаміка параметрів керування судном у момент втрати контролю



Рисунок 5.10

Часова структура рульових команд у передкритичному режимі



а *б*

Рисунок 5.11. Критична траєкторія руху судна

Аналіз траєкторії проходження судном протоки Босфор від Чорного моря показує, що помилкове рішення під час маневру розходження призвело до перетину судном небезпечної ізобати поблизу берегової лінії Туреччини (рис. 5.11 *а*, *б*).

Формалізація процесу керування під час зниження контролю за рухом судна призводить до постановки задачі управління координаційно складними процесами із затримкою реакції оператора. Процес втрати контролю за рухом судна за надмірного інформаційного навантаження цілком може описуватися системою диференціальних рівнянь із затримками, що містить МАІКС як функцію часу, подану нижче.

Оскільки рух судна є фізично неперервним процесом, дискретна модель МАІКС використовується лише як локальна обчислювальна апроксимація допустимих напрямків маневру. Її застосування не скасовує кінематичних і динамічних обмежень судна. Стан судна в момент часу *t* задається вектором.

$$\mathbf{x}(t) = \left(\varphi(t), \lambda(t), V(t), \psi(t), r(t)\right)^T, \tag{5.19}$$

де $\varphi(t)$ і $\lambda(t)$ – географічні координати; $V(t)$ – швидкість; $\psi(t)$ – курс, $r(t)$ – кутова швидкість рискання.

Вектор керування має вигляд $u(t) = \left(\delta_r(t), n(t)\right)^T$, де $\delta_r(t)$ – кут перекладки руля; $n(t)$ – режим роботи рушійного комплексу.

Загальна динаміка судна може бути подана як

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}(t)\right), \tag{5.20}$$

де $\mathbf{w}(t)$ – вектор зовнішніх збурень, що враховує вплив вітру, течії та хвилювання. Навігаційні, гідрографічні й геометричні обмеження акваторії задаються окремо через множину допустимих станів і траєкторій судна.

Допустимі керувальні дії мають задовольняти обмеження: $\left|\delta_r(t)\right| \le \delta_{\max}$, $\left|\dot{\delta}_r(t)\right| \le \dot{\delta}_{\max}$, $\left|\dot{V}(t)\right| \le a_{\max}$.

Таким чином, формування коригувального впливу МАІКС здійснюється лише після перевірки фізичної допустимості маневру.

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathcal{F}\left(\mathbf{s}(t), \mathbf{s}(t-\tau_1), \ldots, \mathbf{s}(t-\tau_z), \mathbf{d}(t)\right), \tag{5.21}$$

де $\mathbf{s}(t) = \left(s_1(t), ..., s_n(t)\right)^{\mathrm{T}}$ – вектор стану системи; $\mathbf{d}(t) = \left(d_1(t), ..., d_m(t)\right)^{\mathrm{T}}$ –вектор коригувальних впливів МАІКС; $\tau_i > 0, i = \overline{1, z}$ – часові затримки реакції оператора та виконавчих компонентів системи.

Під коригувальними впливами розуміють активацію МАІКС або формування рекомендацій системою підтримки прийняття рішень у разі загострення навігаційної ситуації під час управління рухом судна.

Тоді система (5.21) може розглядатися в поєднанні з такими початковими умовами:

$$\mathbf{s}(t) = \boldsymbol{\chi}(t),\ t \in \left[t_0 - \tau_{\max}, t_0\right],\ \tau_{\max} = \max_{1 \le i \le z} \tau_i,\ \boldsymbol{\chi}(t_0) = \mathbf{s}_0, \tag{5.22}$$

де t_0 – момент початку МАІКС.

Множину допустимих впливів МАІКС задаємо класом функцій $\mathbf{d}(t)$, значення яких належать компактній множині $D \subset \mathbb{R}^m$. Множина D ураховує технічні обмеження виконавчих засобів і маневрені характеристики судна. Навігаційні, гідрографічні та гідрометеорологічні обмеження враховуються через вектор зовнішніх збурень, функції обмежень стану та допустимої траєкторії руху судна.

$$\mathbf{d}\left(t\right) \in D \subset \mathbb{R}^m. \tag{5.23}$$

Варто відзначити, що процес МАІКС може розбиватися на етапи, залежно від складності виходу зі створеної ситуації.

Враховуючи, що основна мета МАІКС формалізується в межах системи (5.19)–(5.26), то повинен виконатися ряд умов:

$$\eta_i(\mathbf{d}) = t_1^i(\mathbf{d}) - t_0^i(\mathbf{d}),\ i = \overline{1,q}$$

$$\eta_{q-i+1}\left(\mathbf{d}\right) \ge \eta,\ i = \overline{1,y},\ y \le q\ , \tag{5.24}$$

де $\eta_{q-i+1} = \eta_{q-i+1}\left(\mathbf{d}\right),\ i = \overline{1,y}$ – довжини часових інтервалів відносно етапів МАІКС, що визначаються з умов:

$$c\left(\mathbf{s}(t)\right) \le 0,\ t \in \left[t_0^i(\mathbf{d}), t_1^i(\mathbf{d})\right],\ i = \overline{1,q}, \tag{5.25}$$

де $c(\mathbf{s}(t))$ – функція обмежень навігаційної безпеки, яка має набувати недодатних значень на кожному етапі процесу МАІКС.

Умови (5.24)–(5.26) інтерпретуються як мета збільшення до заданої величини інтервалів коригуючого впливу у ході циклічного загострення ситуації, повторюваних факторів, що призводять до втрати контролю за рухом судна.

Встановлені кількості інтервалів q, y вибираються з аналізу маршруту переходу судна відносно локації, яка не залежить від q, y. Вибір величин q, y також залежить від можливостей МАІКС, маневреності судна тощо, що визначає обмеження для МАІКС. У завданні допускаються обмеження на МАІКС не тільки у формі умови (5.21), але і у вигляді сукупності обмежень типу нерівностей, накладених на кінцевий стан системи в момент t^q_1, що визначає момент завершення процесу МАІКС:

$$J_j(\mathbf{d}) = h_j\left(\mathbf{s}\left(t_1^q(\mathbf{d})\right)\right) \le 0, \;\; j = \overline{y+1, y+\nu}, \tag{5.26}$$

де $h(\cdot)$ – j-та термінальна функція обмежень; ν – кількість обмежень, накладених на кінцевий стан системи.

Як функціонал МАІКС можна розглядати час $T(\mathbf{d}) = t^q_1 - t_0$ досягнення безпечного стану для переходу на ручне керування.

Розглянемо застосування МАІКС у стиснених водах та в умовах обмеженого плавання. Нехай локальний фрагмент електронної навігаційної карти подано в декартовій системі координат і дискретизовано рівномірною ортогональною сіткою. Тоді процес переходу судна в складних стиснених умовах і вузьких місцях можна представити у вигляді траєкторії на дискретній сітці.

Зіставимо коміркам сітки допустимі положення судна, які збігаються з множиною станів, що залежать від стану сусідніх рамок сітки. Дані точки шляху або вузли сітки представимо як поле, що накладається на карту. Сусідами рамки, в якій знаходиться судно в поточний момент часу, називаються рамки, що дотикаються до рамки судна. Набір суден-цілей, що знаходяться поблизу і відносно рамки судна, утворюють поле взаємодії, яке розглядається в даній моделі.

У випадку стандартної картографічної проекції Меркатора будемо називати рамки переходу чотири рамки, які мають з рамкою-судном спільну сторону. У будь-який момент часу стан рамки-судна змінюється залежно від стану поля взаємодії.

Для застосування розроблюваної моделі на практиці рамки

перетворюються відповідно до законів переміщення судна в просторі. Для кожного конкретного випадку рамки переходу будуть мати різні контури, наприклад, у випадку збільшення швидкості ходу судна рамка буде подовжуватися.

Припустимо, що кожне судно прагне рухатися в певному (одному для чотирьох) напрямку. У разі неможливості рухатися в бажаному напрямку, наявності на шляху непереборних картографічних перешкод, обмежень за глибиною з урахуванням осадки судна або значної кількості морського транспорту, капітан судна намагається змінити напрямок руху, вибираючи той, на якому перешкоди мінімальні [148].

Отже, оператори можуть оглядати навігаційну обстановку за допомогою РЛС і НІС у межах доступної дальності щодо спостереження та обирати напрямок руху, в якому спостерігається найменша концентрація морського транспорту і відсутні картографічні перешкоди [149].

У межах ергатичної системи зазначена можливість просторової обсервації є інформаційною передумовою вибору оператором допустимого напрямку маневру. Для ранньої ідентифікації втрати керованості доцільно пов’язати навігаційну обстановку, керувальні дії оператора, інтегральний ризик та коригувальний вплив МАІКС у єдиному контурі.

З урахуванням введеного у (5.18) показника $R_{LC}(t)$ момент початку функціонування МАІКС визначимо як момент першого досягнення порогового рівня τ_{LC}:

$$t_0 = \inf\left\{t : R_{LC}(t) \geq \tau_{LC}\right\} = \inf\left\{t : \sigma\left(\beta_0 + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{q}_w(t)\right) \geq \tau_{LC}\right\}. \qquad (5.27)$$

Співвідношення (5.27) формалізує перехід від спостережуваних ознак нестійкого керування $\mathbf{q}_w(t)$ до активації коригувального контуру. Послідовність q етапів МАІКС подамо у вигляді:

$$t_0 = t_0^1(d) < t_1^1(d) = t_0^2(d) < \ldots < t_1^{q-1}(d) = t_0^q(d) < t_1^q(d). \qquad (5.28)$$

Тривалість окремих етапів та загальний час переходу до кінцевого стану визначаються як:

$$\begin{aligned} &\eta_i(d) = t_1^i(d) - t_0^i(d) > 0,\ i = 1,\ldots,q, \\ &T(d) = t_1^q(d) - t_0 = \sum_{i=1}^{q} \eta_i(d) \end{aligned} \tag{5.29}$$

Для останніх y етапів вимогу щодо мінімальної тривалості стабільного режиму узагальнимо:

$$\min_{i=q-y+1,\ldots,q} \eta_i(d) \geq \bar{\eta},\ 1 \leq y \leq q\,. \tag{5.30}$$

Допустимість стану на всіх етапах коригувального процесу визначимо через введену раніше функцію навігаційних обмежень:

$$\max_{1\leq i\leq q} \sup_{t\in[t_0^i(d),t_1^i(d)]} c\left(\mathbf{s}(t)\right) \leq 0\,. \tag{5.31}$$

Таким чином, умова (5.31) поширює обмеження $c\left(\mathbf{s}\left(t\right)\right) \leq 0$ на весь процес МАІКС без необхідності дискретизації навігаційного простору.

З урахуванням часових затримок реакції оператора і виконавчих компонентів, початкових умов та множини допустимих коригувальних впливів динаміку ергатичного контуру подамо системою:

$$\begin{cases} \mathbf{s}(t) = \Phi\left(\mathbf{s}(t), \mathbf{s}(t-\tau_1), \ldots, \mathbf{s}(t-\tau_z), \mathbf{d}(t)\right), & t \in [t_0, t_1^q(d)] \\ \mathbf{s}(t) = \chi(t), & t \in [t_0 - \tau_{\max}, t_0] \\ \tau_{\max} = \max_{1\leq i\leq z} \tau_i,\ \chi(t_0) = \mathbf{s}_0 & \\ \mathbf{d}(t) \in D \subset \mathbb{R}^m, & t \in [t_0, t_1^q(d)] \end{cases} \tag{5.32}$$

У (5.32) часові затримки τ зберігають у моделі вплив операторської та виконавчої реакції, а множина D визначає область допустимих коригувальних впливів. Сукупність термінальних обмежень кінцевого стану агрегуємо у вигляді:

$$\max_{j=y+1,\ldots,y+\nu} J_j(d) = \max_{j=y+1,\ldots,y+\nu} h_j\left(\mathbf{s}\left(t_1^q(d)\right)\right) \le 0. \qquad (5.33)$$

Отже, (5.31) визначає допустимість станів у процесі коригування, а (5.33) – допустимість його кінцевого результату. На цій основі задачу формування коригувального впливу представимо як:

$$\begin{cases} \mathbf{d}(t) \in D \\ \mathbf{s}(t) = \Phi\left(\mathbf{s}(t), \mathbf{s}(t-\tau_1), \ldots, \mathbf{s}(t-\tau_z), \mathbf{d}(t)\right) \\ \min_{i=q-y+1,\ldots,q} \eta_i(d) \ge \bar{\eta} \\ \max_{1\le i\le q} \sup\limits_{t\in[t_0^i(d), t_1^i(d)]} c\left(\mathbf{s}(t)\right) \le 0 \\ \max_{j=y+1,\ldots,y+\nu} J_j(d) \le 0 \end{cases} \qquad (5.34)$$

Тут $\mathbf{d}^*(\cdot)$ є допустимою реалізацією введеного коригувального впливу $\mathbf{d}(t)$, що мінімізує час $T(d)$, як досягнення безпечного стану за встановлених динамічних, часових і навігаційних обмежень.

Оскільки активація МАІКС визначається умовою $R_{LC}(t) \ge \tau_{LC}$, завершення коригувального режиму пов'яжемо з досягненням термінально допустимого стану та стійким зниженням ризику протягом інтервалу $\bar{\eta}$:

$$\sup_{t\in[t_1^q(d)-\bar{\eta}, t_1^q(d)]} R_{LC}(t) < \tau_{LC} \wedge \max_{j=y+1,\ldots,y+\nu} J_j(d) \le 0. \qquad (5.35)$$

Таким чином, сформований контур поєднує ознаки керувальної діяльності оператора, інтегральний ризик втрати керованості, часові затримки, допустимі коригувальні впливи та умови досягнення безпечного стану. МАІКС при цьому виконує функцію адаптивного захисного механізму ергатичної системи, а не автономної заміни оператора.

Отримана формалізація забезпечує перехід до подальшого дослідження внутрішніх операторських чинників – розподілу уваги, дисторсії суб'єктивного часу та антиципаційно-ентропійних станів, які можуть передувати спостережуваній втраті стійкості керування [284].

5.3. Інформаційно-аналітичні моделі розподілу уваги, дисторсії суб’єктивного часу та антиципаційно-ентропійних станів оператора в процесах управління рухом судна

У попередніх підрозділах 5.1 і 5.2 було показано, що ризики людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення не вичерпуються помилкою як завершеним фактом, а формуються поступово – через зміну структури сприйняття, часової організації дій, нестійкість керувальних впливів і зростання невизначеності при виборі альтернатив. Якщо в підрозділі 5.1 основна увага була зосереджена на *p*-адичній структуризації сприйняття навігаційної ситуації та часових кодах дій, а в підрозділі 5.2 – на ранній ідентифікації втрати керованості й автоматизованому аварійному втручанні, то в підрозділі 5.3 розглядається внутрішній когнітивно-інформаційний механізм, через який людський фактор переходить у ризиковий режим. Саме таким механізмом виступають розподіл уваги, дисторсія суб’єктивного часу та антиципаційно-ентропійні стани оператора [199].

Оператор керує судном у межах міжнародних правил, конвенцій та процедурних обмежень, однак реальна навігаційна обстановка в складних районах плавання значно перевищує рамки нормативно-типових сценаріїв. Висока інтенсивність руху, гідрографічні ускладнення, поєднання маневрових і комунікаційних задач, неоднозначність поведінки інших суден, а також підвищений рівень відповідальності формують ситуації, у яких вирішальним стає не лише знання правил, а здатність оператора вчасно розподілити увагу, коректно оцінити дефіцит часу та часову послідовність подій і побудувати адекватний прогноз розвитку ситуації [220]. У такому контексті людський фактор виявляється не лише у формі помилки, а й у формі зміни когнітивного режиму, що передує помилковому рішенню [83].

Особливо складними є ситуації розходження двох суден, а також взаємодії судна з перешкодами, коли нормативні правила мають інтерпретуватися з урахуванням просторової конфігурації, швидкості зближення, локальних обмежень і суб’єктивної оцінки безпосередності

небезпеки. За таких умов одна й та сама навігаційна подія може бути сприйнята різними операторами по-різному, що безпосередньо впливає на темп реакції, вибір стратегії та траєкторію керування. Під час аналізу траєкторії руху судна необхідно враховувати невизначеність, зумовлену операторською складовою ергатичної системи. Ця обставина безпосередньо впливає на точність прогнозування переміщення судна і, відповідно, не дає змогу визначити причини відхилень траєкторій від розрахункових даних, сформованих бортовими інформаційними системами (рис. 5.12).

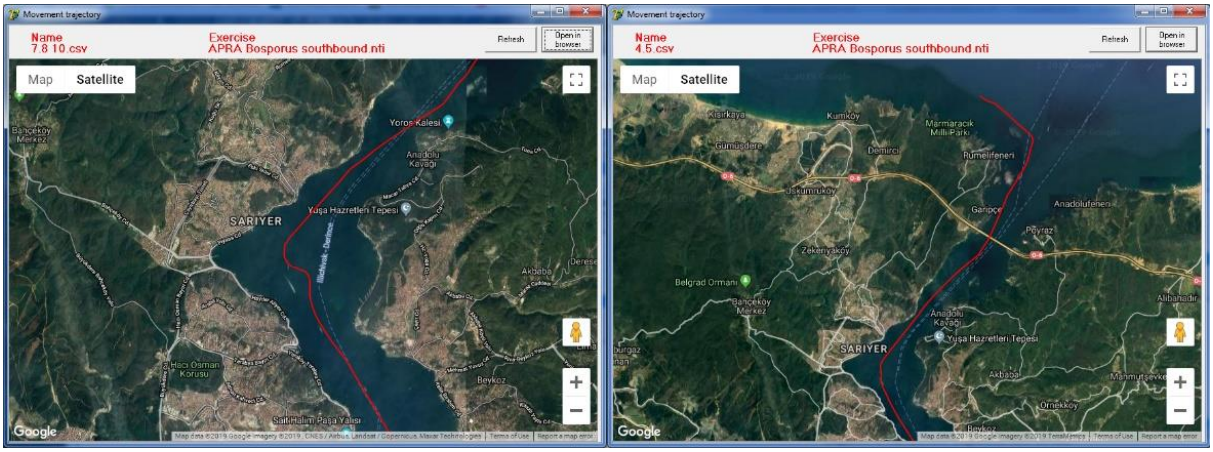


Рисунок 5.12. Відхилення від оптимальної траєкторії

Як видно з первинного аналізу, траєкторія маневру, наведена праворуч на рис. 5.12 суттєво відрізняється від прийнятного без видимих причин. Аналіз дав змогу пов'язати це відхилення з особливостями сприйняття оператором часових меж виконання операції [74]. Параметр сприйняття часу оператором є фактором невизначеності $a \in A$ у ситуації $s \in S$, при цьому, ідентифікатор ситуації може бути представлений у вигляді $\pi(s) = \varphi(s, A) = \bigcup_{a \in A} \varphi(s, a)$, а оптимальність враховує фактори невизначеності в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathrm{Max}}(S, \varepsilon) &= \left\{ s \in S \mid \pi(s) \subset \mathrm{Max}\left(\pi(s), \varepsilon\right) \right\} = \\ &\left\{ s \in S \forall x \in \pi(s), f(x) \right\} \geq \sup\left\{ f(y) \mid y \in \pi(S) \right\} - \varepsilon = \\ &= \left\{ s \in S \mid \inf\left\{ f(x) \mid x \in \pi(s) \right\} + \varepsilon \geq \sup\left\{ f(y) \mid y \in \pi(S) \right\} \right\}. \end{aligned} \tag{5.36}$$

Дані дослідження та вказані залежності дозволяють визначити ступінь впливу на ситуацію інформаційних сигналів з боку фізичного середовища, використовуючи дані навігаційних сенсорів і приладів. Однак запропоновані моделі розглядають час лише як дискретну складову, що не дає змогу визначити фактори його сприйняття. Інші моделі представляють ситуацію як описову та базуються на емпіричних експериментах, які підтверджують гіпотезу про зміну сприйняття часу оператором у критичних ситуаціях, але не дають уявлення про залежності сприйняття часу під час виконання завдань у формальному вигляді. Очевидно лише те, що суб'єктивна оцінка тривалості та послідовності подій суттєво відрізняється від показників приладів і безпосередньо впливає на поведінку оператора, що може підвищувати невизначеність під час прийняття рішень, а отже, впливає на фізичну траєкторію руху судна [75].

Людино-машинна взаємодія є одним із ключових компонентів функціонування ергатичних систем, яка безпосередньо впливає на кінцевий результат. У сучасних критичних інфраструктурах, де в інформаційному контурі присутній оператор, від якого залежить загальна безпека, ці процеси викликають підвищений інтерес. Сучасні інформаційні технології, спрямовані на забезпечення безпеки ергатичних систем на прикладі морських перевезень, не завжди враховують прояви людського фактора [81], що може значною мірою підвищувати ризик розвитку аварійної ситуації. Засоби сигналізації в основному мають характер попередження про перетин судном небезпечних зон або наближення до суден-цілей (рис. 5.13, 5.14), перешкод або небезпечних ізобат, для чого встановлюється контур безпеки.



Рисунок 5.13. Визначення небезпечних зон судноплавства



Рисунок 5.14. Відображення рамки безпеки судна

Оператор може обирати й навіть створювати контури, на які буде реагувати система безпеки. У системі ECDIS достатньо засобів для автоматизованого налаштування безпеки з використанням електронних навігаційних карт. У складі інтегрованого на містку комплексу окремі підсистеми також забезпечують сигналізацію про технічні несправності та небезпечні гідрометеорологічні умови. Водночас функції динамічного оцінювання реакції оператора на сукупний потік навігаційних даних і сигналів тривоги залишаються обмеженими. В основному цю проблему намагаються вирішити за рахунок вибору операторів високої кваліфікації, але не враховується досвід, в якому він формувався під час навчання. Крім того, під час проєктування доцільно орієнтуватися не лише на експертно-задані дії висококваліфікованих фахівців, а й на типові профілі операторів із різним рівнем досвіду. Ряд попередніх досліджень дозволив звернути увагу на вплив окремих груп факторів, які негативно впливають на поведінку оператора, концентрацію уваги та особливості комунікації в групі. Однак залишаються невирішеними питання, пов'язані з плануванням траєкторії дій і очікуванням майбутнього результату, які формуються індивідуально. Розуміється, що для отримання результатів в цьому напрямку необхідно визначити інформаційні ознаки та сигнали, придатні для побудови автоматизованих засобів підвищення безпеки судноводіння.

Таким чином, виділяється проблема, пов'язана з фактом негативного прояву антиципації оператора як складової людського фактора [77]. Аналіз аварій, а також робота з операторами під час проходження тренажерної підготовки на навігаційних симуляторах у Херсонській державній морській академії доводить, що вирішальним під час прийняття рішень є саме антиципація. Особливо цей людський фактор проявляється в ситуаціях, коли вже досвідчений оператор на прикладі капітана далекого плавання або його першого помічника керує судном в відомій їм акваторії. Щоб нівелювати негативний прояв антиципації, важливо розробити автоматизовані засоби її ідентифікації та проявів в динаміці відносно кожного оператора [69].

Важливо зазначити, збільшення обсягу даних, опрацьованих на першому рівні, може підвищити точність формального опису на другому рівні, але водночас збільшує обчислювальні та часові витрати. Особливості системи повинні передбачати можливість перегляду балансу інформаційних ресурсів в процесі ідентифікації індивідуальної моделі поведінки оператора.

На першому рівні система, залежно від поведінки оператора, формує приблизні значення рівня суб'єктивної ентропії. Перехід до другого рівня ініціюється на основі збереження негативних ознак протягом інтервалу, що перевищує встановлене порогове значення.

Однією з ознак втрати концентрації управління судном є підвищення рівня суб'єктивної ентропії [121]. Ці етапи діяльності оператора, де негативні прояви людського фактора стають помітними, зазвичай виникають в непередбачуваних ситуаціях.

У результаті втрати концентрації виникають різкі та неадекватні реакції на ситуацію з боку оператора [96]. Тому ідентифікація цих факторів в умовах нестабільності і необхідної оперативності є викликом для систем безпеки управління морським транспортом.

Практика також демонструє, що стресові ситуації по-різному впливають на самоконтроль і, у результаті, можуть посилювати нестійкість поведінки оператора [95]. Причиною стресу можуть бути не лише ситуації, пов'язані з управлінням судном, але й соціально-психологічний клімат в екіпажі.

Для усунення неоднозначності подальшої оптимізаційної постановки введені простори *M, J, Y* і *Z* надалі розглядаються не як абстрактні геометричні конструкції, а як нормовані ознакові простори, сформовані на основі спостережуваних даних ергатичної системи навігаційного забезпечення. Простір *M* містить фактори першого рівня, що підвищують суб'єктивну ентропію оператора; простір *J* містить контекстні фактори другого рівня; простір *Y* описує спостережувані прояви суб'єктивної ентропії; простір *Z* містить допустимі коригувальні впливи системи.

Зокрема, $\mathbf{m} = (m_1, m_2, ..., m_k) \in M$, може включати показники щільності трафіку, складності локації, кількості одночасних інформаційних сигналів, часової напруженості та нестабільності керування; $\mathbf{j} = (j_1, j_2, ..., j_l) \in J$, може включати погодні умови, режим видимості, тип маневру, досвід оператора та сценарний контекст; $\mathbf{y} = (y_1, y_2, ..., y_m) \in Y$, описує прояви суб'єктивної ентропії: нестійкість уваги, збільшення часу реакції, зміну стратегії дій, зростання кількості корекцій, порушення послідовності прийняття рішень; $\mathbf{z} = (z_1, z_2, ..., z_r) \in Z$, описує керувальні впливи: попереджувальний сигнал, зміну режиму інформаційного відображення, рекомендацію посилити вахту, активацію допоміжного аналізу або перехід до аварійного режиму підтримки.

Проведемо моделювання. Нехай *M* і *J* – евклідові простори факторів, що впливають на підвищення суб'єктивної ентропії оператора, що проявляються на першому і на другому рівні формальної системи відповідно, з можливістю визначення їх рівня системою. При цьому для кожного оператора існує психологічний бар'єр роботи в умовах спрацьовування факторів з просторів *M* і *J*, а також індивідуальний набір чинників такий, що, $W = M \times J$, $\dot{W} \subset w$, $\dot{W}$ - множина допустимих чинників $\mathbf{w} = (\mathbf{m}, \mathbf{j}) \in W$ на першому і другому рівнях.

Виходячи з цього, завдання системи полягає в знаходженні індивідуально орієнтованого вектора підвищення суб'єктивної ентропії оператора.

Приймемо, що: $M_W := \{\mathbf{m} \in M : \exists \mathbf{j} \in J, (\mathbf{m}, \mathbf{j}) \in W\}$,

$$J_W(\mathbf{m}) := \{\mathbf{j} \in J : (\mathbf{m}, \mathbf{j}) \in W\}, \mathbf{m} \in M_W. \quad (5.37)$$

Нехай Y – евклідів простір проявів суб'єктивної ентропії, підлягає аналізу системою. При цьому $\hat{y}$ – шуканий на першому рівні вектор з Y, ідентифікований за рядом ознак від факторів m, $Y(\mathbf{m})$ – множина значень вектора y при аналізі за такими чинниками m, $F(m, y)$ - критерій ідентифікації.

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \mathbf{y}) = \left(F_1(\mathbf{m}, \mathbf{y}), F_2(\mathbf{m}, \mathbf{y}), ..., F_K(\mathbf{m}, \mathbf{y})\right) \to \min, \ \mathbf{y} \in Y(\mathbf{m}), \quad (5.38)$$

де F_1 може характеризувати рівень суб'єктивної ентропії; F_2 – часову затримку реакції; F_3 – нестійкість розподілу уваги; F_4 – відхилення від експертно-заданого сценарію дій.

Для практичного обчислення багатокритеріальна задача може бути зведена до скалярного критерію:

$$F_\omega(\mathbf{m}, \mathbf{y}) = \sum_{k=1}^{K} \omega_k \tilde{F}_k(\mathbf{m}, \mathbf{y}), \ \sum_{k=1}^{K} \omega_k = 1, \ \omega_k \geq 0, \quad (5.39)$$

де $\tilde{F}_k$ – нормовані часткові критерії; ω_k – вагові коефіцієнти, визначені експертно або за результатами калібрування на тренажерних даних.

Тоді є підстава в тому, що точково-множинне відображення $Y_P(\mathbf{m})$ для $\mathbf{F}(\mathbf{m}, \mathbf{y})$ передбачає, що і множина оптимальних рішень задачі є непорожньою:

$$Y_P(\mathbf{m}) = ParetoArgmin_{\mathbf{y} \in Y(\mathbf{m})} \mathbf{F}(\mathbf{m}, \mathbf{y}). \quad (5.40)$$

Непорожність множини оптимальних рішень не приймається як апріорне припущення, а забезпечується стандартними умовами існування мінімуму. Якщо множина $Y(\mathbf{m})$ є непорожньою, замкненою та компактною, а функція $F_\omega(\mathbf{m},\mathbf{y})$ є неперервною за $\mathbf{y}$, тоді існує принаймні один розв'язок

$$Y_0(\mathbf{m}) = Arg \min_{\mathbf{y} \in Y(\mathbf{m})} F_\omega(\mathbf{m}, \mathbf{y}) \neq \varnothing \quad (5.41)$$

Це дає змогу коректно використовувати множину $Y_0(\mathbf{m})$ у подальшій процедурі вибору керувального впливу.

Будемо вважати, що замкнена множина проявів суб'єктивної ентропії щодо основних функцій оператора в момент управління судном буде повною

мірою проаналізовано системою: $\dot{M}_a \subset dom\dot{Y}(\cdot)$ – множина векторів факторів, для яких задача ідентифікації має єдиний розв'язок:

Важливим етапом у ході моделювання є оцінка похибки знаходження вектора $\hat{y}$, з метою чого вводимо невід'ємну числову функцію $\delta(m)$, певну на множині $dom\dot{Y}(\cdot)$, таку, що:

$$\sup\left\{\|y-\hat{y}\| : y \in \dot{Y}_0(m)\right\} \le \delta(m), \tag{5.42}$$

при цьому $\delta(m)=0$ для $m \in \dot{M}_a$ і $\delta(m)>0$ для $m \in dom\dot{Y}(\cdot) \setminus \dot{M}_a$, де $\dot{M}_a$ – достатня множина чинників для ідентифікації вектора.

Це дозволить визначити нижню межу можливості інформаційної системи у ході ідентифікації індивідуального набору критичних факторів, що впливають на суб'єктивну ентропію.

З метою опису дій другого рівня позначимо: H – евклідів простір векторів z, що впливає на зниження рівня суб'єктивної ентропії, що плануються разом з вектором $\hat{y}$. Далі, нехай $Z(y, j) \subset Z$ і числова функція $\mathbf{\Phi}(m, y, j, z)$ – відповідно допустима множина проявів людського фактора і критерій для вибору вектора z, при цьому $\mathbf{\Phi}(m, y, j, z)$ є підсумковою характеристикою роботи системи після другого рівня [235].

Введення залежності $\mathbf{\Phi}$ як від y, так і від m викликана потребою визначення тимчасового балансу роботи інформаційної системи на першому і другому рівнях.

При цьому метою керувальних впливів системи є максимально вірогідне визначення векторів впливу на підвищення суб'єктивної ентропії оператора, що отримується після другого рівня з урахуванням часових витрат спрацьовування системи $c_1(m)$ і $c_2(j)$ щодо факторів m і j, таких що, $\mathbf{\Phi}(m, y, j, z) = -[\pi(y, z) - c_1(m) - c_2(j)]$, де $\pi(y, z)$ – результат, принесений системою при виборі вектора z керувальних впливів з вектором у вихідних даних.

$$\mathbf{z}^{*} = \arg\min_{\mathbf{z}\in Z(\mathbf{y}^{*},\mathbf{j})} \Phi\left(\mathbf{m},\mathbf{y}^{*},\mathbf{j},\mathbf{z}\right), \tag{5.43}$$

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

Цільова функція має вигляд:

$$\Phi\left(\mathbf{m},\mathbf{y}^{*},\mathbf{j},\mathbf{z}\right) = \lambda_1 R\left(\mathbf{m},\mathbf{y}^{*},\mathbf{j},\mathbf{z}\right) + \lambda_2 H\left(\mathbf{y}^{*},\mathbf{z}\right) + \lambda_3 T\left(\mathbf{z}\right) + \lambda_4 C\left(\mathbf{z}\right), \tag{5.44}$$

де R – залишковий ризик після впливу; H – рівень суб'єктивної ентропії після впливу; T – час реалізації впливу; C – операційна вартість або складність впливу; λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 – вагові коефіцієнти.

Результат роботи системи визначається рівністю:

$$\xi\left(\mathbf{m},\mathbf{j}\right) = \min_{\mathbf{z}\in Z(\mathbf{y}^{*},\mathbf{j})} \Phi\left(\mathbf{m},\mathbf{y}^{*},\mathbf{j},\mathbf{z}\right). \tag{5.45}$$

Практична реалізація запропонованої дворівневої моделі передбачає перехід від формального опису суб'єктивно-ентропійного стану оператора до прикладної процедури вибору коригувального впливу. На першому етапі система збирає первинні дані ергатичної системи навігаційного забезпечення: параметри руху судна, сигнали ECDIS/AIS, траєкторні відхилення, часові інтервали реакцій, журнальні файли тренажера, конфігурацію небезпечних зон, параметри інформаційного навантаження та спостережувані поведінкові реакції оператора.

На другому етапі виконується попередня обробка цих даних: синхронізація часових рядів, вилучення неповних або аномальних записів, нормування різнорідних параметрів і формування ознакового опису поточного стану. У результаті дані приводяться до структурованого вигляду, придатного для подальшого оцінювання факторів першого рівня, контекстних факторів другого рівня, проявів суб'єктивної ентропії та можливих коригувальних впливів.

На третьому етапі реалізується перший рівень моделі – ідентифікація суб'єктивно-ентропійного стану оператора. Для цього оцінюються ознаки нестійкості уваги, збільшення часу реакції, зміни стратегії дій, зростання кількості корекцій, порушення послідовності прийняття рішень і відхилення

від індивідуально стабільного сценарію поведінки. Результатом цього етапу є визначення домінуючих проявів людського фактора, які можуть підвищувати ризик переходу ергатичної системи до передкритичного або критичного режиму.

На четвертому етапі формується множина допустимих керувальних або інформаційних впливів. До неї можуть входити попереджувальний сигнал, зміна режиму інформаційного відображення, рекомендація посилити навігаційну вахту, активація допоміжного контуру аналізу, звернення до капітана або перехід до режиму аварійної підтримки. Склад цієї множини залежить від поточної навігаційної ситуації, рівня ризику, часу реакції, маневрених характеристик судна, нормативних обмежень і індивідуального профілю оператора.

На п’ятому етапі виконується другий рівень моделі – вибір найбільш доцільного коригувального впливу. При цьому система порівнює допустимі варіанти за залишковим ризиком, очікуваним зниженням суб’єктивної ентропії, часом реалізації впливу, операційною вартістю та відсутністю додаткового ризику для поточного режиму руху судна. Перевага надається такому впливу, який забезпечує найбільше зниження ризику без створення додаткового навантаження або нової небезпечної ситуації.

На шостому етапі обраний вплив проходить перевірку за обмеженнями безпеки, нормативної допустимості, часової доцільності та технічної реалізованості. Якщо вплив не відповідає хоча б одному з цих обмежень, система повертається до попереднього етапу й обирає інший допустимий варіант. Якщо обмеження виконуються, вплив реалізується у вигляді попередження, рекомендації, зміни інформаційного режиму або активації відповідного контуру підтримки.

На сьомому етапі система фіксує реакцію оператора на сформований вплив, зміну параметрів руху судна, зміну рівня ризику та подальшу динаміку суб’єктивно-ентропійного стану. Отримані результати використовуються для оновлення індивідуального профілю оператора, уточнення порогів

спрацьовування, коригування вагових коефіцієнтів і підвищення точності подальшої ідентифікації ризикових режимів.

Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує прикладну реалізацію дворівневої моделі у вигляді послідовності: збір даних – попередня обробка – ідентифікація суб'єктивно-ентропійного стану – формування множини допустимих впливів – вибір оптимального впливу – перевірка обмежень – реалізація впливу – адаптивне оновлення індивідуального профілю оператора. Така процедура дає змогу перейти від абстрактної оптимізаційної постановки до практичного контуру підтримки прийняття рішень у ергатичній системі навігаційного забезпечення.

Індивідуальне налаштування режимів роботи системи може виконуватися на основі тренажерних, експлуатаційних або навчальних даних, отриманих під час виконання типових навігаційних завдань. У межах Розділу 5 ця процедура розглядається як методичний принцип адаптації системи до індивідуального профілю оператора. Конкретний склад показників, джерела даних та експериментальна реалізація такого налаштування в тренажерному середовищі наведено в розділі 6.

Надалі, ґрунтуючись на ознаках схильності операторів, система адаптується до районів плавання та завдань, які виконуються під час управління рухом судна в реальних умовах.

Таким чином, завершальним етапом є побудова моделі поведінки оператора в момент виникнення позаштатних ситуацій.

У NTPRO 5000 реєструються 55 показників, які для подальшого аналізу розподіляються між вхідним вектором факторів **m** і вектором спостережуваних проявів **y**. Кожен оператор має індивідуальний підхід до вирішення завдань управління судном. Отже, взаємозалежність цих 55 факторів визначатиме поведінку оператора в різних ситуаціях.

Таким чином, первинними даними є сигнали ІСНЗ, траєкторні відхилення, конфігурації небезпечних зон, параметри містка, часові характеристики дій та спостережувані поведінкові реакції оператора. На їх основі формуються ознаки розподілу уваги, дисторсії суб'єктивного часу,

негативної антиципації та зростання суб’єктивної ентропії. Сукупність цих ознак дає змогу ідентифікувати стан оператора як стан когнітивної стійкості або її порушення в процесі керування рухом. Далі визначається інтегральний рівень ризику, що враховує ступінь нестійкості вибору дій і порушення часової організації керування. Після цього активується правило керування у вигляді дворівневої оптимізаційної схеми, що пов’язує ідентифікацію проявів суб’єктивної ентропії з вибором коригувального впливу [224]. Завершальним етапом стає втручання, спрямоване на зниження ентропії, стабілізацію розподілу уваги, компенсацію негативної антиципації та адаптацію інформаційного контуру під індивідуальний профіль оператора [229].

Розроблені в підрозділі моделі забезпечують перехід від фіксації зовнішніх ознак небезпечної навігаційної ситуації до формалізованого оцінювання внутрішніх когнітивно-часових механізмів операторської діяльності. Розподіл уваги, дисторсія суб’єктивного часу, антиципаційні прояви та суб’єктивна ентропія розглядаються як взаємопов’язані ознаки зміни стійкості оператора, що дає змогу ідентифікувати передумови ризикового режиму, оцінювати індивідуальну реакцію на навігаційне навантаження та обґрунтовувати вибір адаптивного коригувального впливу в ІСНЗ. Це формує завершений інформаційно-аналітичний контур «стан оператора – прояв людського фактора – оцінка ризику – керувальний вплив» і створює методичну основу для подальшого врахування професійної взаємодії операторів у структурі ергатичної системи навігаційного містка.

5.4. Методичні засади психодіагностичного оцінювання та тренінгового формування взаємодії «капітан–лоцман» в ергатичній системі навігаційного містка

5.4.1. Вибірка та організація формувального експерименту

У підрозділах 5.1–5.3 було послідовно показано, що ризики людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення формуються як результат взаємодії інформаційного поля оператора, структури сприйняття навігаційної ситуації, дисторсії суб'єктивного часу, розподілу уваги, антиципаційних механізмів і суб'єктивно-ентропійних станів. У такій логіці підрозділ 5.4 виконує завершальну методичну функцію: він переводить попередньо обґрунтовані модельні положення у площину психодіагностичного вимірювання, тренінгового формування та експертної верифікації професійної взаємодії в ергатичній системі навігаційного містка [303].

Експериментальне дослідження було спрямоване на перевірку ефективності спеціально організованих тренінгових технологій формування результативної взаємодії «капітан судна – лоцман» у процесі професійної підготовки операторів [304]. Дослідження реалізовано у форматі констатувального та контрольного зрізів із використанням комплексу психодіагностичних методик, експертного оцінювання результатів підготовки інструкторами та подальшого аналізу індивідуальних змін [321].

Учасниками дослідження виступили делегати курсу в кількості n=3; середній вік становив 46,33 року; усі учасники – чоловіки. За підсумковими відомостями до вибірки ввійшли один капітан і два старші помічники капітана. Навчання здійснювалося в межах курсу Master/Pilot Relationships on the bridge, тривалістю 5 днів, що відповідає 1 кредиту ЄКТС. Організація формувального етапу передбачала участь керівника курсу, оператора тренажерного комплексу, двох інструкторів та практикуючого лоцмана. Упродовж навчання забезпечувався безперервний моніторинг виконання вправ, дисципліни

взаємодії на містку, якості професійної комунікації та обґрунтованості рішень у змодельованих ситуаціях [276].

У методологічному відношенні цей експеримент є прикладною формою перевірки тих положень, які в попередніх розділах дисертації були сформульовані теоретично. Якщо у Розділах 1–2 було закладено концептуально-структурні основи інформаційного поля оператора, ролі людського фактора та механізмів функціонування ергатичної системи навігаційного містка, а в підрозділах 5.1–5.3 ці положення набули вигляду формальних моделей оцінювання станів і ризиків, то у підрозділі 5.4 вони конкретизуються у вигляді методики виявлення, вимірювання та цілеспрямованого формування тих професійно важливих якостей, від яких безпосередньо залежить безпечна взаємодія «капітан–лоцман» [57].

5.4.2. Методи, інструментарій і показники психодіагностичного оцінювання

Для досягнення цілей дослідження застосовано комплекс методик, що дозволив оцінити:

– регуляторну здатність очікувань;

– рівень соціальних очікувань;

– мотиваційно-смислову структуру особистості;

– копінг-стратегії поведінки в стресових і конфліктних умовах професійної діяльності.

Використано такі інструменти:

– методику Expected Situation / Realization of Expectations, орієнтовану на оцінювання регуляторної здатності очікувань;

– опитувальник Level of Social Expectations;

– опитувальник Level of Aspirations of Personality;

– опитувальник Way of Coping Questionnaire (WCQ).

За даними валідаційних досліджень використаних адаптацій психодіагностичних методик, показники внутрішньої узгодженості становлять: α_{LSE} = 0,721; α_{LAP} = 0,831; α_{WCQ} = 0,818. Ці значення характеризують надійність шкал у відповідних валідаційних вибірках.

Водночас коефіцієнти внутрішньої узгодженості характеризують надійність використаних психодіагностичних шкал, але не усувають обмежень, пов’язаних із малою вибіркою, короткою тривалістю формувального впливу та відсутністю контрольної групи. Тому отримані результати слід інтерпретувати як первинну методичну апробацію, а не як завершене експериментальне доведення ефективності тренінгової технології.

Змістовно цей інструментарій виконує функцію емпіричного відображення змінних, які в підрозділах 5.1–5.3 були описані формально. Регуляторна здатність очікувань і рівень соціальних очікувань характеризують стан внутрішньої готовності оператора до узгодженого функціонування в професійній комунікації та до підтримання стійкого контуру прийняття рішень [69]. Мотиваційно-смислова структура відображає рівень мобілізації, складність сприйняття завдань, очікування результату та особистісну ініціативу. Копінг-стратегії фіксують ступінь самоконтролю, схильність до уникнення, позитивну переоцінку складних ситуацій і способи подолання професійного стресу. У сукупності ці показники є психодіагностичними маркерами процесів, які в попередніх підрозділах були пов’язані з розподілом уваги, дисторсією суб’єктивного часу, антиципацією та суб’єктивною ентропією. Статистичну обробку виконано із застосуванням SPSS v.23.0 та MS Excel. Обчислено середні значення M і середньоквадратичні відхилення SD. Відмінності між показниками до і після формувального етапу оцінювалися за *t*-критерієм Стьюдента. Застосування параметричних критеріїв за $n = 3$ має допоміжний характер і не може розглядатися як достатня підстава для інференційних статистичних висновків. Тому основний акцент у дослідженні зроблено на описовій статистиці, індивідуальних профілях змін, напрямі зсувів та їхній професійно-прикладній інтерпретації. Значення *t*-критерію або відповідні рівні значущості використовуються лише як орієнтовні показники і не підміняють повноцінної перевірки ефективності методики на більшій вибірці.

5.4.3. Результати констатувального етапу психодіагностичного оцінювання

5.4.3.1. Регуляторна здатність очікувань

На констатувальному етапі визначено середні значення показників регуляторної здатності очікувань делегатів: інтернальність/екстернальність – 0,88 (SD 0,03); активність/пасивність – 0,93 (SD 0,06); відкритість/закритість – 0,93 (SD 0,08); адекватність/неадекватність – 0,17 (SD 0,06).

Таблиця 5.1. Параметри регуляторної здатності очікувань на констатувальному етапі (M; SD)

Scale	Arithmetic mean, M	Mean-square deviation, SD
Internality / Externality (IEp)	0,88	0,03
Activeness / Passiveness (APp)	0,93	0,06
Openness / Closeness (OCp)	0,93	0,08
Adequacy / Inadequacy (AIp)	0,17	0,06

Наведені результати свідчать про переважання внутрішнього фокуса контролю, активної позиції та відносної відкритості у професійній взаємодії. Для ергатичної системи навігаційного містка це є функціонально значущою передумовою, оскільки такі характеристики підтримують цілісність інформаційного поля оператора, стабільність прийняття рішень і готовність до кооперативної взаємодії у лоцманському контурі управління рухом судна [296].

5.4.3.2. Рівень соціальних очікувань

За опитувальником Level of Social Expectations отримано такі середні значення: рівень усвідомлення очікуваних подій (LAEp) – 24,00 (SD 0,00); рівень очікуваного ставлення (LEAp) – 18,33 (SD 2,31); рівень очікуваної результативності (LEPp) – 47,33 (SD 0,58); загальний рівень соціальних очікувань особистості (LSEp) – 89,67 (SD 2,08).

Таблиця 5.2. Описові статистики параметрів рівня соціальних очікувань на етапі (M; SD)

Scale	Arithmetic mean, M	Mean-square deviation, SD
The Level of Awareness of the Expected Events (LAEp)	24,00	0,00
The Level of the Expected Attitude (LEAp)	18,33	2,31
The Level of the Expected Performance (LEPp)	47,33	0,58
The Level of Social Expectations of Personality (LSEp)	89,67	2,08

Отримані значення відображають достатню структурованість соціальних очікувань і прийнятний рівень регулятивного потенціалу учасників у професійній взаємодії. У термінах попередніх підрозділів це означає, що вихідний соціально-регулятивний контур вибірки є відносно стабільним і може виступати компенсатором негативних проявів суб'єктивної ентропії під час роботи в умовах навігаційної невизначеності [113].

5.4.3.3. Мотиваційно-смислова структура

На етапі констатації середні значення за шкалами опитувальника Level of Aspirations of Personality становили: Internal Motif (IM) – 17,00 (SD 1,00); Cognitive Motif (CM) – 20,00 (SD 1,00); Avoidance Motif (AM) – 12,33 (SD 3,51); Motif of Competition (MC) – 14,33 (SD 3,55); Motif of Changing Activity (MCA) – 8,00 (SD 1,00); Motif of Self-Respect (MS) – 18,67 (SD 2,08); Significance of Results (SR) – 3,33 (SD 0,57); Task Complexity (TC) – 5,00 (SD 2,65); Volitional Effort (VE) – 14,33 (SD 5,51); Estimation of the Level of the Achieved Results (ELAR) – 12,67 (SD 0,58); Estimation of Personal Potential (EPP) – 16,68 (SD 2,52); Projected Level of Mobilizing Efforts (PLME) – 19,00 (SD 1,00); Expected Level of Results (ELR) – 11,67 (SD 3,22); Regularity of Results (RR) – 18,00 (SD 3,00); Initiative (I) – 14,00 (SD 1,73).

Таблиця 5.3. Описові статистики параметрів мотиваційно-смислової структури на етапі (M; SD)

Scale	Arithmetic mean, M	Standard deviation, SD
Internal Motif (IM)	17,00	1,00
Cognitive Motif (CM)	20,00	1,00
Avoidance Motif (AM)	12,33	3,51
The Motif of Competition (MC)	14,33	3,55
The Motif of Changing Activity (MCA)	8,00	1,00
The Motif of Self-Respect (MS)	18,67	2,08
The Significance of Results (SR)	3,33	0,57
Task Complexity (TC)	5,00	2,65
Volitional Effort (VE)	14,33	5,51
Estimation of the Level of the Achieved Results (ELAR)	12,67	0,58
Estimation of Personal Potential (EPP)	16,68	2,52
The Projected Level of Mobilizing Efforts (PLME)	19,00	1,00
The Expected Level of Results (ELR)	11,67	3,22
Regularity of Results (RR)	18,00	3,00
Initiative (I)	14,00	1,73

Профіль мотиваційно-смислових параметрів загалом узгоджується з логікою професійної діяльності в системі навігаційного містка: виразними є когнітивний мотив, самоповага та мобілізаційний потенціал, тоді як параметри складності завдання та очікуваного результату мають варіативні значення. Це є типовим для умов, де оператор функціонує в інформаційно насиченому та ризиковому середовищі, а отже має безперервно співвідносити рівень відповідальності, складність задачі та власну готовність до її виконання.

5.4.3.4. Копінг-стратегії

За методикою Way of Coping Questionnaire на констатувальному етапі отримано: Confrontation (C) – 7.00 (SD 1,00); Distancing (D) – 6.67 (SD 2,31); Self-Control (SC) – 14.00 (SD 1,73); Seeking Social Support (SSS) – 9,67 (SD 1,53); Accepting Responsibility (AR) – 6,00 (SD 1,00); Avoidance (A) – 4,67 (SD 2,08); Planning to Solve a Problem (PSP) – 16,00 (SD 3,46); Positive Overestimation (PO) – 10,33 (SD 3,21).

Таблиця 5.4. Частотні характеристики параметрів копінг-стратегій на констатувальному етапі (M; SD)

Scale	Arithmetic mean, M	Mean-square deviation, SD
Confrontation (C)	7,00	1,00
Distancing (D)	6,67	2,31
Self-Control (SC)	14,00	1,73
Seeking Social Support (SSS)	9,67	1,53
Accepting Responsibility (AR)	6,00	1,00
Avoidance (A)	4,67	2,08
Planning to Solve a Problem (PSP)	16,00	3,46
Positive Overestimation (PO)	10,33	3,21

Початковий профіль копінгу демонструє вираженість самоконтролю та орієнтацію на планування розв'язання проблем при помірному рівні уникнення [95]. Для безпеки судноводіння це принципово важливо, оскільки саме самоконтроль, планування та прийняття відповідальності знижують імовірність переходу до дезорганізованої поведінки в ситуаціях інформаційної перевантаженості, часової напруги та комунікаційної невизначеності [82].

5.4.4. Результати формувального етапу та порівняльний аналіз «до/після»

5.4.4.1. Зміни рівня соціальних очікувань (LSE)

За підсумками формувального етапу порівняння середніх показників «до/після» для LSE зафіксувало такі значення: LAEp – 24,00 → 24,67; t = 0,529; LEAp – 18,33 →19,00; t=0,184; LEPp – 47,33 →46,33; t=0,580; LSEp – 89,67 →90,33; t=0,728.

Таблиця 5.5. Порівняння параметрів рівня соціальних очікувань до і після формувального етапу (M; t)

Scale	Average values		
	Delegates (n=3)		
	Before	After	Student's t-test value
The Level of Awareness of the Expected Events (LAEp)	24,00	24,67	0,529
The Level of the Expected Attitude (LEAp)	18,33	19,00	0,184
The Level of the Expected Performance (LEPp)	47,33	46,33	0,580
The Level of Social Expectations of Personality (LSEp)	89,67	90,33	0,728

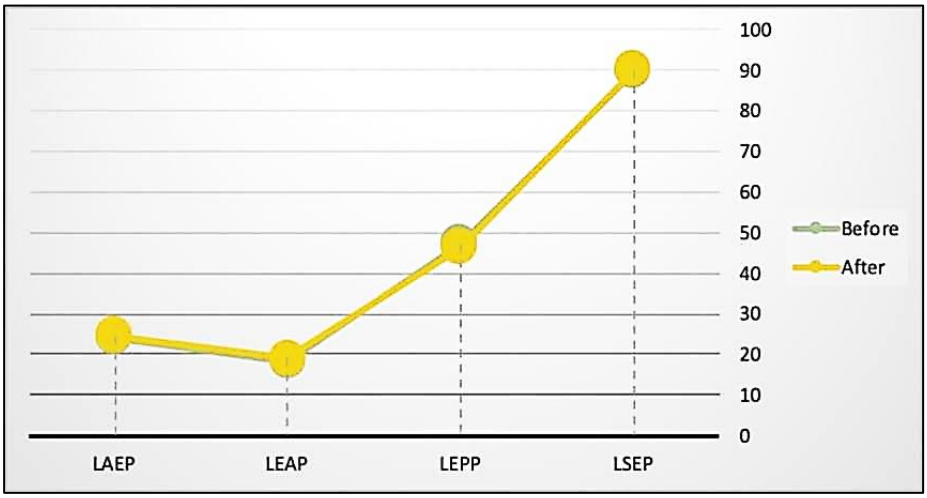


Рисунок 5.15. Порівняння параметрів рівня соціальних очікувань до і після формувального етапу

Після формувального етапу простежується позитивний зсув за параметром очікуваного ставлення (LEAp), який є найбільш вираженим позитивним трендом серед показників LSE. Разом із тим, за сукупністю шкал статистично значущих змін не зафіксовано. Для логіки даної дисертації це означає, що короткотривалий формувальний вплив уже виявляє тенденцію до посилення соціально-регулятивного компонента взаємодії, однак для його стійкого закріплення потрібне триваліше тренінгове супроводження.

5.4.4.2. Зміни мотиваційно-смислових параметрів (LAP)

Порівняння «до/після» за опитувальником Level of Aspirations of Personality дало такі результати: IM – 17,00 →19,33; t=0,118; CM – 20,00 →20,00; t=1,0; AM – 12,33 →14,33; t=0,074; MC – 14,33 →14,00; t=0,808; MCA – 8,00 →8,67; t=0,423; MS – 18,67 →18,67; t=1,0; SR – 3,33 →4,00; t=0,184; TC – 5,00 →8,67; t=0,087; VE – 14,33 →14,00; t=0,885; ELAR – 12,67 →13,67; t=0,225; EPP – 16,68 →17,33; t=0,184; PLME – 19,00 →19,67; t=0,184; ELR – 11,67 →11,33; t=0,423; RR – 18,00 →17,33; t=0,742; I – 14,00 →16,67; t=0,057.

Таблиця 5.6. Порівняння параметрів мотиваційно-смислової структури до і після формувального етапу (M; t)

Scale	Average values		
	Delegates (n=3)		
	Before	After	Student's t-test value
Internal Motif (IM)	17,00	19,33	0,118
Cognitive Motif (CM)	20,00	20,00	1,0
Avoidance Motif (AM)	12,33	14,33	0,074
The Motif of Competition (MC)	14,33	14,00	0,808
The Motif of Changing Activity (MCA)	8,00	8,67	0,423
The Motif of Self-Respect (MS)	18,67	18,67	1,0
The Significance of Results (SR)	3,33	4,00	0,184
Task Complexity (TC)	5,00	8,67	0,087
Volitional Effort (VE)	14,33	14,00	0,885
Estimation of the Level of the Achieved Results (ELAR)	12,67	13,67	0,225
Estimation of Personal Potential (EPP)	16,68	17,33	0,184
The Projected Level of Mobilizing Efforts (PLME)	19,00	19,67	0,184
The Expected Level of Results (ELR)	11,67	11,33	0,423
Regularity of Results (RR)	18,00	17,33	0,742
Initiative (I)	14,00	16,67	0,057

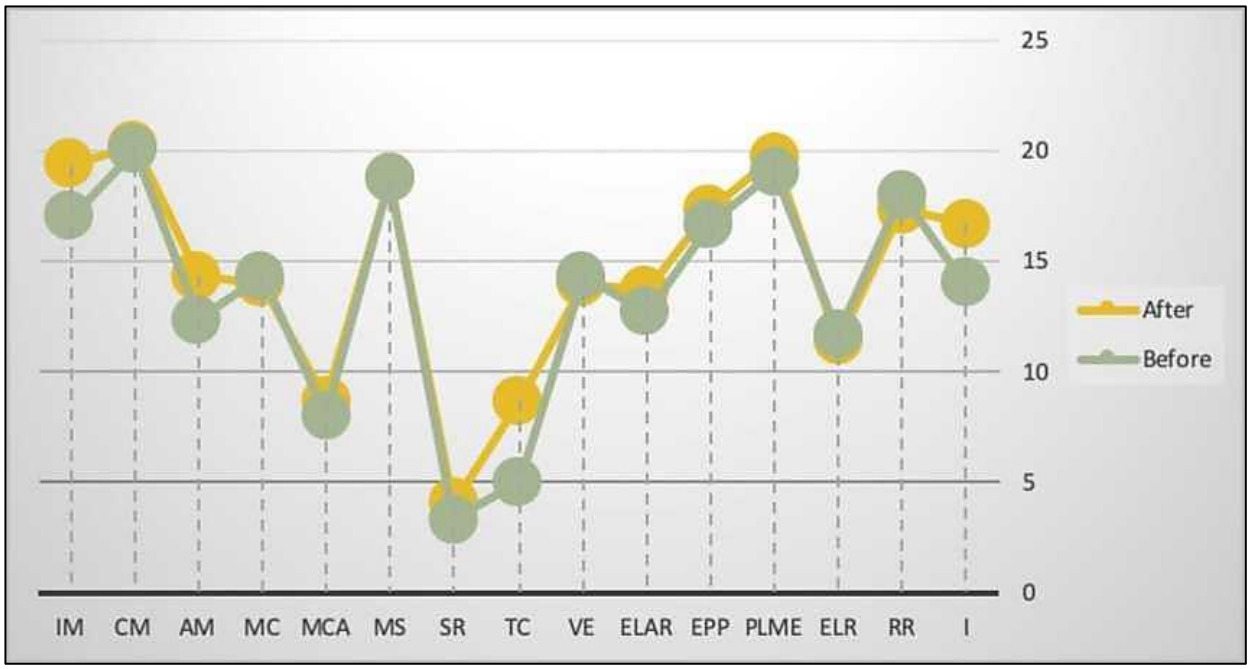


Рисунок 5.16. Порівняння параметрів мотиваційно-смислової структури до і після формувального етапу

Найбільш виразні позитивні тенденції зафіксовано для уникнення невдачі (AM), складності завдання (TC) та ініціативи (I). У професійно-прикладному сенсі це означає, що після тренінгового впливу учасники стали чутливішими до складності ситуації, більш готовими до активного включення у вирішення задачі та схильними до більшої ініціативності. Саме ці параметри мають ключове значення для системи навігаційного забезпечення, оскільки вони знижують ризик пасивного очікування, покращують своєчасність реакцій і підтримують стійкість контуру прийняття рішень та управління рухом судна в умовах підвищеного навігаційного ризику.

5.4.4.3. Зміни копінг-стратегій (WCQ)

Порівняння «до/після» за методикою Way of Coping Questionnaire дало такі результати: C – 7,00 →6,33; t=0,184; D – 6,67 →5,33; t=0,383; SC – 14,00 →16,00; t=0,074; SSS – 9,67 →12,67; t=0,188; AR – 6,00 →6,33; t=0,742; A – 4,67 →6,00; t=0,270; PSP – 16,00 →14,00; t=0,225; PO – 10,33 →13,33; t=0,035.

Таблиця 5.7. Порівняння параметрів копінг-стратегій до і після формувального етапу (M; t)

Scale	Average values		
	Delegates (n=3)		
	Before	After	Student's t-test value
Confrontation (C)	7,00	6,33	0,184
Distancing (D)	6,67	5,33	0,383
Self-Control (SC)	14,00	16,00	0,074
Seeking Social Support (SSS)	9,67	12,67	0,188
Accepting Responsibility (AR)	6,00	6,33	0,742
Avoidance (A)	4,67	6,00	0,270
Planning to Solve a Problem (PSP)	16,00	14,00	0,225
Positive Overestimation (PO)	10,33	13,33	0,035

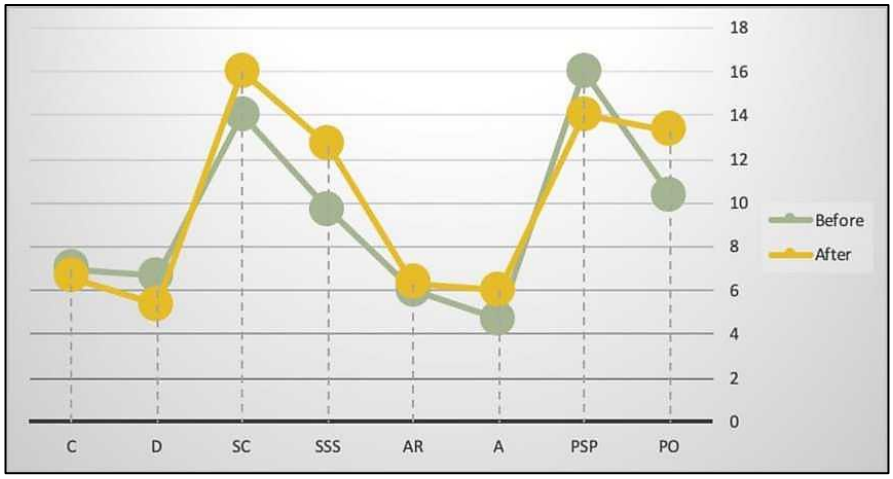


Рисунок 5.17. Порівняння параметрів копінг-стратегій до і після формувального етапу

$$\Delta X_{ik} = X_{ik,after} - X_{ik,before},$$
$$\Delta X_{ik}^{rel} = \frac{X_{ik,after} - X_{ik,before}}{\left|X_{ik,before}\right|} \cdot 100\% \cdot \quad (5.46)$$

Для малої вибірки більш інформативним є не лише порівняння середніх значень, а й аналіз індивідуальних змін у кожного учасника. Тому для кожного делегата доцільно визначати абсолютний та відносний зсув показника до і

після формувального етапу. Такий підхід дає змогу виявити, чи є позитивна тенденція груповим ефектом, чи вона формується за рахунок одного учасника.

Найбільш помітні позитивні тенденції виявлено для самоконтролю (SC) та позитивної переоцінки (PO). Це узгоджується з логікою тренінгового впливу: зростання внутрішньої регуляції поведінки та здатності переосмислювати складні ситуації як керовані задачі є функціонально важливим для надійної комунікації й ухвалення рішень у взаємодії «капітан–лоцман». У контексті підрозділів 5.1–5.3 це можна інтерпретувати як підвищення показників саморегуляції та позитивної переоцінки складних професійних ситуацій, тобто підвищення стійкості до переходу в дезорганізовані когнітивно-емоційні стани.

5.4.5. Експертне оцінювання сформованості професійної взаємодії «капітан–лоцман»

Після завершення формувального етапу проведено експертне оцінювання інструкторами, яке розглядається як зовнішній критерій перевірки сформованості професійно важливих компетентностей. З етичних причин та з огляду на конфіденційність персональних даних у тексті наведено узагальнені результати.

Узагальнені підсумкові результати, наведені у формі Master/Pilot Relationship Course Evaluation Sheet. Середні результати виконання завдань становили 80%, 60% і 64% за трьома делегатами відповідно. За критерієм Candidate passed зафіксовано: Yes; No; No. За показником Needs further training зазначено: No; Yes; Yes. У полі Performance to be reviewed відображено: No; Training; Training. Якісні коментарі інструкторів підкреслюють важливість тренування в середовищі навігаційного містка – тренажера, що формує професійно значущий досвід взаємодії, підтримує стійкість поведінки та дає змогу виявити слабкі компоненти координації дій на навігаційному містку.

Для деталізації результатів проведено узагальнення за ключовими критеріями професійної взаємодії, найбільш релевантними до задач лоцманської проводки та командної роботи на навігаційному містку.

Таблиця 5.8. Зведені результати експертного оцінювання за ключовими критеріями взаємодії «капітан – лоцман» (n=3)

Criteria	Result	
Deals with critical situation if Pilot on Board	81%; 68%; 65%	Competent; Needs Training; Needs Training
Effective Master - Pilot Exchange	81%; 64%; 66%	Competent; Needs Training; Needs Training
Maneuvering the ship to pilot boarding area	81%; 56%; 64%	Competent; Needs Training; Needs Training
Bridge Team Management - Communication	84%; 64%; 61%	Competent; Needs Training; Needs Training
Keep situational awareness	80%; 56%; 61%	Competent; Needs Training; Needs Training
Necessary steps if in doubt with pilot on board	78%; 59%; 61%	Needs Improvement; Needs Training; Needs Training
Effective Passage Planning and exchange with and without Pilot	80%; 59%;73%	Competent; Needs Training; Needs Training
Ship Maneuvering arrival or departure with and without Pilot	76%; 59%; 60%	Needs Improvement; Needs Training; Needs Training

Таблиця 5.8 деталізує ключові критерії взаємодії та результативності в типових задач лоцманської проводки. У межах цієї малої вибірки експертне оцінювання засвідчує нерівномірність сформованості компетентностей у межах малої групи та підтверджує, що навіть за наявності достатньої базової підготовки частина критичних навичок взаємодії на містку потребує подальшого цілеспрямованого тренування. Це має принципове значення, оскільки демонструє що психодіагностичні зрушення повинні співвідноситися з реальною професійною поведінкою в контурі навігаційного забезпечення та в системі спільного прийняття рішень на містку [189, 287].

5.5. Висновки до розділу 5

У розділі 5 розв’язано науково-прикладне завдання розроблення моделей і методів управління ризиками людського фактора в ергатичних системах навігаційного забезпечення на основі формалізації процесів сприйняття навігаційної ситуації, часової організації дій оператора, розподілу

уваги, дисторсії суб’єктивного часу, антиципаційно-ентропійних станів та процедур корекції режимів керування в умовах підвищеного навігаційного ризику [275]. За результатами виконаних досліджень сформульовано такі висновки.

1. Розроблено підхід до *p*-адичної структуризації сприйняття навігаційних ситуацій, у межах якого процес ідентифікації ситуації та переходів між рівнями її осмислення подано як переходи між вузлами-категоріями у графових просторах $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$, $Z_{(p=4)}$. Це дало можливість формально описати якісні переходи між спрощеним, лінгвістично деталізованим і багатофакторним рівнями сприйняття, а також дослідити їхній зв’язок із рівнем підготовки оператора, складністю навігаційної задачі та часовими фрагментами прийняття рішень.

2. Установлено, що часові діапазони виконання елементарних дій та переходів між просторами сприйняття можуть бути використані як індивідуальні часові коди дій оператора. На основі аналізу log-файлів ECDIS, даних навігаційного тренажера та траєкторій типових маневрів показано, що саме часові інтервали, а не лише геометрія маршруту, можуть використовуватися як інформативні ознаки стійкості прийняття рішень оператором.

3. Обґрунтовано метод ранньої ідентифікації втрати керованості судна, у якому ризик розглядається як результат одночасної взаємодії просторової та навігаційної складності акваторії, нестійкості керувальних дій оператора та обмеженості допустимих коригувальних впливів. Це дозволило перейти від післяаварійного аналізу людської помилки до виявлення передкритичних станів ергатичної системи на етапі, коли ще можливе своєчасне підтримувальне або аварійне втручання.

4. Запропоновано формальний апарат автоматизованої інтелектуальної коригувальної системи, у межах якого процес втрати керованості подано як динамічну систему із затриманими реакціями оператора та зовнішнім керувальним впливом [223, 236, 241, 245, 268]. Уведення допустимої області коригувальних впливів, поетапних умов стабілізації та термінальних

обмежень безпечного стану забезпечило формалізацію переходу від операторського контуру керування до автоматизованого режиму підтримки або аварійного розходження в умовах підвищеного навігаційного ризику [225, 240, 272, 273, 283].

5. Розроблено узагальнену оптимізаційну модель адаптивного коригувального керування МАІКС, у якій момент активації системи визначається досягненням інтегральним показником ризику втрати керованості $R_{LC}(t)$ порогового рівня, а подальший процес подано як послідовність часових етапів із урахуванням затримок реакції оператора, множини допустимих керувальних впливів, обмежень безпеки та умов досягнення кінцевого допустимого стану. Це дало змогу сформалізувати задачу вибору коригувального впливу за критерієм мінімізації часу переходу до безпечного режиму та визначити умови завершення автоматизованої підтримки за одночасного виконання термінальних обмежень і стійкого зниження $R_{LC}(t)$ нижче порога активації.

6. Побудовано інформаційно-аналітичну дворівневу модель ідентифікації негативних проявів людського фактора, в якій перший рівень забезпечує виявлення проявів суб’єктивної ентропії оператора за множиною критичних факторів, а другий – формує вектор керувального впливу, оптимальний за прийнятим зваженим критерієм для зниження ентропії, стабілізації уваги та компенсації дисторсії суб’єктивного часу. Це дозволило пов’язати розподіл уваги, антиципацію, часову невизначеність і керувальні рішення в єдиному контурі управління ризиками людського фактора.

7. Обґрунтовано розгляд негативних проявів антиципації, порушень розподілу уваги та зростання суб’єктивної ентропії як внутрішніх ознак переходу ергатичної системи від штатного до ризикового режиму. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на зовнішні сигнали небезпеки, запропонований підхід враховує внутрішній когнітивно-часовий стан оператора як об’єкт аналізу та врахування під час формування підтримувальних і коригувальних впливів.

8. Запропоновано методичні засади психодіагностичного оцінювання та тренінгового формування взаємодії «капітан–лоцман» як прикладної форми зниження ризиків людського фактора в ергатичній системі навігаційного містка. Апробація дала змогу перевірити структуру діагностичного комплексу, встановити напрями індивідуальних змін і показати потенційну придатність поєднання психодіагностичних шкал, експертного оцінювання та аналізу професійної поведінки.

9. Показано, що ефективне управління ризиками людського фактора в системах навігаційного забезпечення повинно реалізовуватися як інтегрований контур: дані про середовище та оператора → ознаки стану і поведінки → ідентифікація рівня ризику → правило корекції режиму керування → підтримувальне, коригувальне або тренінгове втручання. Саме така структура узгоджує результати Розділу 5 з концептуальними положеннями Розділів 1–2 та забезпечує перехід від аналітичного виявлення проявів людського фактора до побудови процедур профілактики, контролю та зниження негативних наслідків людського фактора [269].

РОЗДІЛ 6. Експериментальна верифікація моделей і методів управління інформаційною системою навігаційного забезпечення

6.1. Експериментальна база верифікації моделей ергатичних систем навігаційного забезпечення

Експериментальну верифікацію результатів дисертаційного дослідження виконано з використанням спеціалізованого програмно-апаратного, тренажерного та інформаційно-аналітичного середовища. Це забезпечило перевірку працездатності моделей, методів і засобів управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, розроблених у попередніх розділах дисертації [293]. У попередніх розділах було обґрунтовано, що ергатична система навігаційного забезпечення є багатокомпонентним інформаційно-керувальним контуром, у якому поєднані судно, оператор, зовнішнє навігаційне середовище, інформаційне поле, технічні засоби спостереження, канали комунікації, нормативні обмеження, засоби підтримки прийняття рішень і режими керування. Така постановка дала змогу розглядати ІСНЗ як цілісну систему взаємодії оператора, навігаційної інформації, аналізу та керувальних рішень [301, 302].

Необхідність побудови багаторівневої експериментальної бази була зумовлена охопленням різних рівнів формалізації: концептуально-структурної моделі інформаційного поля оператора, моделі стійкості та керованої динаміки ІСНЗ, фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій, експертного оцінювання відхилень від експертно-заданого профілю руху судна, непрямої ідентифікації функціональних станів оператора, прогнозування критичних ситуацій та інтеграції результатів у ІСНЗ і МАІКС. Тому експериментальна перевірка була побудована як послідовний контур.

У такій постановці людський фактор було враховано як внутрішній функціональний компонент ергатичного контуру. Його вплив у подальшій експериментальній перевірці фіксувався через сукупність вимірюваних або розрахункових ознак: параметри траєкторії, часові затримки, повторні звернення до навігаційних засобів, відхилення від експертно-заданого

профілю, структуру взаємодії з ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, GPS, а також допоміжні фізіологічні і термографічні маркери.

Експериментальна база дослідження сформована як багаторівневий контур верифікації: тренажерний рівень відтворення навігаційних сценаріїв; інформаційний рівень отримання AIS/ECDIS даних; аналітико-програмний рівень обробки траєкторій, ідентифікації відхилень, зон ризику та прогнозних ознак; обчислювальний рівень реалізації модулів ІСНЗ, МАІКС та процедури підтримки керування. Така структура дала змогу перевірити повний ланцюг: отримання навігаційних даних, їх обробку, обчислення індикаторів, експертну або статистичну інтерпретацію, формування рекомендацій і перевірку реакції оператора [317].



Рисунок 6.1. Тренажерне та інформаційно-аналітичне середовище експериментальної верифікації моделей ІСНЗ

Навігаційний тренажер у цьому контурі виконував функцію контрольованого джерела експериментальних сценаріїв (рис. 6.1). Його застосування дало змогу багаторазово відтворити типові, ускладнені та критичні навігаційні ситуації, змоделювати ручні та автоматизовані режими керування, зафіксувати параметри руху судна і зіставити дії оператора з просторово-часовим контекстом сценарію. Сервери даних ECDIS та AIS

сформували базовий інформаційний шар траєкторної верифікації. На їх основі були отримані координатні, часові, курсові та швидкісні дані, які надалі використовувалися для фрактально-епізодного аналізу, експертного оцінювання ECDIS-відхилень, геоінформаційного подання результатів і формування автоматизованих рекомендацій. Дані RADAR/ARPA та GPS забезпечили уточнення відносного руху цілей, параметрів зближення, положення власного судна, просторового ризику та ситуаційного контексту. Завдяки цьому експериментальна перевірка охопила навігаційний, ситуаційний і керувальний зміст даних.

Експериментальні дані для аналізу часових і поведінкових характеристик оператора були отримані з використанням навігаційного тренажера Navi-Trainer Professional 5000. Це забезпечило відтворення складних районів плавання, моделювання режимів керування, реєстрацію параметрів руху судна, фіксацію дій оператора та зіставлення цих дій із контекстом навігаційної ситуації.

Тренажерне середовище NTPRO 5000 забезпечило реєстрацію курсу, швидкості, просторового положення судна, параметрів руху, даних ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, GPS та органів керування (табл. 6.1). Саме така комплексність джерел дала змогу перейти від ізольованого аналізу траєкторії до експериментального аналізу операторського профілю в межах ІСНЗ.

Таблиця 6.1. Паспорт експериментального тренажерного середовища верифікації моделей ІСНЗ

Параметр	Опис
Назва тренажера	Navi-Trainer Professional 5000
Скорочена назва	NTPRO 5000
Інтегрована ECDIS-платформа	Wärtsilä Navi-Sailor ECDIS
Тип тренажера	Навігаційний тренажер судноводіння
Локація сценарію	Протока Босфор, район порту Сінгапур та район Port Huron–Sarnia
Режим керування	Автопілот / ручне керування
Реєстровані параметри	Курс, швидкість, surge, sway, pitch, yaw, roll, heave, rpm, положення судна
Джерела даних	ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, GPS, органи керування
Склад учасників	Вахтові помічники капітана, курсанти та оператори навігаційного тренажера відповідно до програми конкретного експерименту

Наведений паспорт експериментального середовища містить дані, які було використано для перевірки моделей ІСНЗ.

Експериментальна верифікація результатів дисертаційного дослідження розглядалася як перевірка наскрізного ланцюга моделей, методів та індикаторів, сформованих у розділах 2–5 [293]. У розділі 2 задано концептуально-структурний і аналого-індикаторний блок ІСНЗ; у розділі 3 – формалізовано AIS/ECDIS-траєкторію; у розділі 4 – введено операторський контур оцінювання стану оператора; у розділі 5 описано переходи між рівнями сприйняття ситуації та корекцію режимів керування.

Вихідний траєкторний об’єкт має вигляд:

$$S^{(k)} = \{t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i\}_{i=1}^{N_k}, \tag{6.1}$$

де $S^{(k)}$ – нормалізований траєкторний ряд *k*-го проходу. Операторський контур подається як:

$$X(t) \to Z(t) \to \hat{S}(t) \to \hat{R}(t+\Delta t) \to U_{rec}(t), \tag{6.2}$$

де $X(t)$ – первинні навігаційні, часово-поведінкові й операторські дані; $Z(t)$ – нормований вектор ознак; $\hat{S}(t)$ – оцінений стан оператора або операторського процесу; $\hat{R}(t+\Delta t)$ – прогнозований рівень ризику; $U_{rec}(t)$ – керувальна або рекомендаційна дія ІСНЗ.

Узагальнено експериментальна перевірка Розділу 6 зводиться до формального ланцюга:

$$S^{(k)}, X(t), W(t), \mathbf{\Lambda}, G_p \Rightarrow Z(t) \Rightarrow \hat{S}(t) \Rightarrow \hat{R}(t+\Delta t) \Rightarrow U_{rec}(t), \tag{6.3}$$

де $W(t)$ – нормований вектор розподілу уваги оператора, $\mathbf{\Lambda}$ – матриця інтенсивностей переходів між часовими станами операторського циклу, $G_p = (V_p, E_p)$ – граф *p*-рівневої деталізації сприйняття навігаційної ситуації. Такий запис не вводить нової моделі, а фіксує формальну узгодженість результатів попередніх розділів із процедурою експериментальної перевірки [39, 188, 302, 317].

Таблиця 6.2. Формально-логічна матриця верифікації результатів дослідження

Рівень верифікації	**Формальний об'єкт**	**Що перевіряється**	**Критерій / результат**	**Практичне використання**
Дані ІСНЗ	$F^{(k)} \to S^{(k)}$	Придатність AIS/ECDIS-даних до уніфікованої обробки	Нормалізація часу, координат, курсу, ROT, XTE	Підготовка даних до фрактального й експертного аналізу
Траєкторна мікроваріатив-ність	$S^{(k)} \to$ chaos_score, confidence_index	Зв'язок локальної нерегулярност і руху з ризиком	Kruskal–Wallis, Mann–Whitney, Spearman, $\Phi_{\geq 3}$	Ранжування проходів, карта ризику, вибір епізодів для розбору
Експертно-задане ECDIS-оцінювання	$P_{fact} \leftrightarrow P_{ref}$	Відповідність фактичного проходу експертно-заданого профілю	Просторові, курсові, швидкісні та статистичні відхилення	Інструкторськи й контроль, тренажерний розбір, аудит проходу
Операторсько-часовий рівень	$X(t) \to Z(t) \to W(t)$, Λ, G_p	Перехід від спостережень до стану оператора	Часові затримки, увага, переходи між фазами дій і просторами сприйняття	Діагностика напруження, втрати темпу, перебудови рішення
Багатоканальн і ознаки стану	$Z_{HF}(t) \to \hat{S}_{HF}(t)$	Узгодженість траєкторних, часових, поведінкових і допоміжних фізіологічних ознак	Багатоканальн а інтерпретація з урахуванням контексту	Уточнення стану оператора, картографічне відображення напруження
Інтегральний ризик	$E,C,S,U \to I_{HF \to R}$	Здатність показника розрізняти режими ІСНЗ	Метод Monte Carlo, $Q_{0.05}$, $Q_{0.95}$, P_{stable}, $P_{strained}$, $P_{critical}$	Сценарне ранжування ризику, підтримка рішень, коригувальні рекомендації

Матриця показує, що Розділ 6 виконує функцію не опису окремих експериментів, а інтегральної перевірки повного переходу: від первинних навігаційних даних до діагностичних ознак, оцінювання стану оператора, прогнозування ризику та ризик-орієнтованої підтримки прийняття рішень в ІСНЗ.

Наведена формально-логічна схема надає підстави для переходу до першого експериментального рівня – верифікації фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій.

6.2. Експериментальна верифікація фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій та геоінформаційне відображення результатів

Після формування експериментальної бази було виконано перевірку працездатності фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій як інструмента кількісного оцінювання мікроваріативності руху судна та визначення її зв’язку з рівнем навігаційного ризику з урахуванням дій оператора. Цей етап забезпечив перехід від первинних навігаційних даних до формалізованих індикаторів, придатних для подальшої статистичної, просторової та експертної інтерпретації в контурі ергатичних систем навігаційного забезпечення.

Експериментальна перевірка була спрямована на підтвердження прикладної працездатності фрактального апарату в умовах обробки великого масиву AIS/ECDIS-проходів. У межах цього підрозділу фрактально-епізодний аналіз був реалізований як завершений програмно-аналітичний конвеєр, що поєднав нормалізацію траєкторій, аналіз траєкторій у ковзних вікнах, обчислення локальних фрактальних ознак, агрегацію інтегральних індексів, статистичну перевірку, робастний аналіз та геоінформаційне представлення результатів.

Первинні AIS/ECDIS-файли у кількості 8686 було перетворено на нормалізовані траєкторні ряди, придатні для метричного, часово-просторового та фрактального аналізу. На першому етапі різноформатні записи було зведено до уніфікованого формату, який включав часові мітки, координати у метричній системі, курс, швидкість, кутову швидкість повороту, поперечне відхилення та інші похідні ознаки руху судна. Така уніфікація забезпечила можливість порівняння проходів, отриманих із різних файлів і сценаріїв та дала змогу перейти до формалізованої оцінки їх локальної мікроваріативності.

Поданий конвеєр забезпечив послідовний перехід до трьох форм результату: числової, просторової та текстової. Числова форма була представлена індексами chaos_score і confidence_index; просторова форма – інтерактивною HTML-мапою; текстова форма – автоматизованими рекомендаціями. Така структура підтвердила, що фрактально-епізодний аналіз було реалізовано як прикладний інструмент, придатний для подальшої інтеграції в експертні системи та ІСНЗ.

На рівні окремого проходу або фрагмента руху судна локальні фрактальні ознаки були програмно агреговані в інтегральний показник хаотичності мікрорухів судна – chaos_score. У межах експериментальної перевірки цей індекс використовувався як нормована кількісна оцінка траєкторної мікроваріативності, локальної нерегулярності та складності реалізованого руху. Комплементарним до нього був індекс confidence_index, який характеризував відносну стабільність, упорядкованість і передбачуваність траєкторної реалізації.

Фрактально-епізодний аналіз перевіряє перехід від нормалізованої AIS/ECDIS-траєкторії до кількісних індикаторів мікроваріативності руху. Вихідним об’єктом є ряд:

$$S^{(k)} = \{t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i\}_{i=1}^{N_k}. \tag{6.4}$$

Для кожного проходу формується послідовність ковзних вікон:

$$S^{(k)} \to \{B_j^{(k)}\}_{j=1}^{m_k}, \tag{6.5}$$

у яких обчислюються фрактальні та динамічні ознаки. Узагальнений результат подається як:

$$S^{(k)} \to \{B_j^{(k)}\} \to \{F_j^{(k)}\} \to E^{(k)} \to \left(C_{chaos}^{(k)}, C_{conf}^{(k)}\right), \tag{6.6}$$

де $F_j^{(k)}$ – вектор локальних фрактальних і динамічних ознак, $E^{(k)}$ – сукупність епізодів підвищеної мікроваріативності, $C_{chaos}^{(k)} = chaos\_score^{(k)}$, $C_{conf}^{(k)} = confidence\_index^{(k)}$.

Змістовність індексу chaos_score перевіряється через його зв’язок із категоріями навігаційного ризику: $H_0 : C_{chaos} \perp L_{risk}$, $H_1 : C_{chaos} \not\perp L_{risk}$.

Оскільки рівні ризику мають порядковий характер, застосовуються непараметричні критерії:

$$C_{chaos} \to [H_{KW}, U_{MW}, \rho_S], \tag{6.7}$$

де H_{KW} – критерій Краскела–Волліса, U_{MW} – парні порівняння Манна–Вітні, ρ_S – коефіцієнт Спірмена між chaos_score та severity_code. Додатково перевіряється робастність за умовою достатнього віконного покриття:

$$\mathcal{K}_{rob} = \{k : \Phi_{k\geq 3}\}. \tag{6.8}$$

Позитивний статистично значущий зв'язок chaos_score з рівнем ризику та збереження цього зв'язку на підмножині $\Phi_{k\geq 3}$ підтверджують, що індекс не є випадковим наслідком довжини треку або малої кількості вікон. Він може використовуватися як кількісний проксі-індикатор траєкторної мікроваріативності.

Практичне використання результату полягає у ранжуванні проходів, просторовій локалізації нерегулярних фрагментів траєкторії, відборі епізодів для експертного аналізу та формуванні карти ризик-орієнтованих індикаторів.

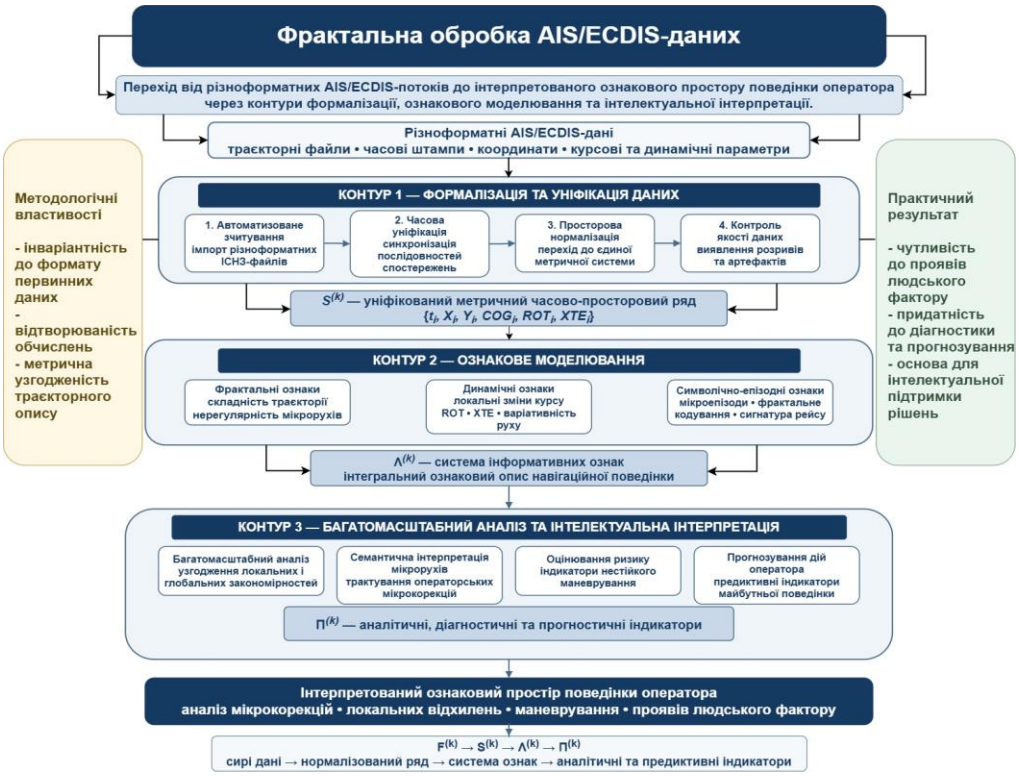


Рисунок 6.2. Узагальнений конвеєр фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій

Принциповим обмеженням інтерпретації було те, що chaos_score дозволив зафіксувати траєкторну мікроваріативність руху, яка може бути використана як непрямий індикатор впливу людського фактора лише за умови зіставлення з режимом керування, навігаційним контекстом, зовнішніми умовами, журналами маневрування та експертною розміткою.

Таблиця 6.3. Загальна характеристика блоку AIS/ECDIS-проходів суден та емпіричні діапазони індексів chaos_score і confidence_index

Показник	**Значення**
Загальна кількість проходів	8686
Кількість включених проходів	8684
Кількість виключених проходів	2
Мінімальний chaos_score	0
Максимальний chaos_score	0,537832034
Середній chaos_score	0,246463881
Медіана chaos_score	0,253518041
Мінімальний confidence_index	0,462167966
Максимальний confidence_index	1
Середній confidence_index	0,753536119
Медіана confidence_index	0,746481959

Значення, наведені в таблиці 6.3, підтвердили достатній обсяг досліджуваного блоку даних для інтегральної перевірки індексної моделі. До аналізу було включено 8684 проходи з 8686, що забезпечило репрезентативну основу для статистичної оцінки. Емпіричний діапазон chaos_score від 0 до 0,537832034 свідчить про те, що у досліджуваному блоці даних не спостерігалося граничних значень індексу траєкторної нерегулярності. Водночас наявність проходів із підвищеними значеннями chaos_score засвідчила суттєву локальну мікроваріативність окремих траєкторних реалізацій. У результаті середні та медіанні значення chaos_score і confidence_index характеризують центральну тенденцію досліджуваної сукупності траєкторій, враховуючи великий блок змішаних AIS/ECDIS-траєкторій.

Для перевірки змістовності індексу chaos_score було виконано зіставлення його значень із категоріями навігаційного ризику. Така перевірка дала змогу встановити, чи був chaos_score лише внутрішнім числовим

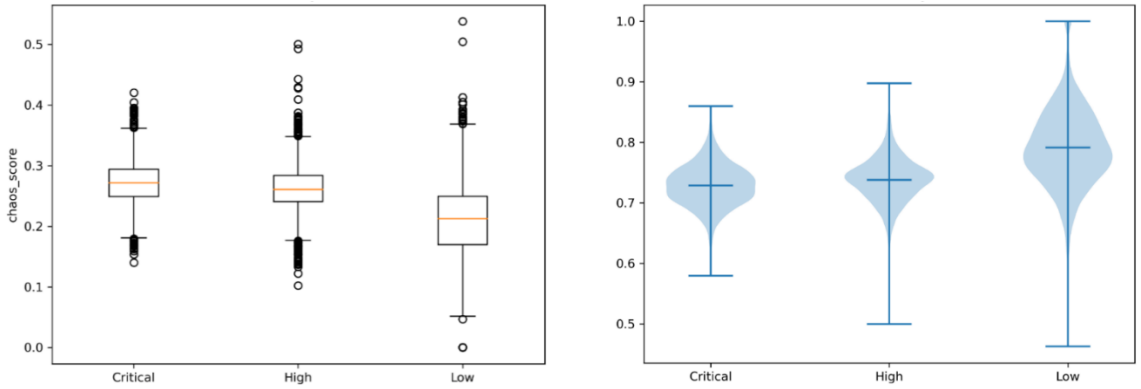
результатом фрактальної обробки, чи він статистично узгоджувався з ризиковими атрибутами навігаційної ситуації. Оскільки для розподілів індексів не було підтверджено відповідність нормальному закону, а категорії ризику мали порядковий характер, для формальної перевірки було застосовано непараметричні методи: критерій Краскела-Волліса, парні порівняння Манна-Вітні та коефіцієнт рангової кореляції Спірмена.

Таблиця 6.4. Результати непараметричної перевірки зв’язку chaos_score із рівнями навігаційного ризику

Перевірка	**Повна вибірка**	**Робастна підмножина $\Phi_{k \geq 3}$**
Kruskal–Wallis, chaos_score by risk_level	2083,59	1774,812601; $p < 10^{-300}$
Mann–Whitney: Critical vs High	4634224	430932; $p = 8{,}059 \cdot 10^{-5}$
Mann–Whitney: Critical vs Low	6208117	2443869; $p = 6{,}888 \cdot 10^{-290}$
Mann–Whitney: High vs Low	7305864	1455287; $p = 2{,}057 \cdot 10^{-214}$
Spearman: chaos_score vs severity_code	0,465872403	0,604712534; $p < 10^{-300}$

Результати таблиці 6.4 підтвердили статистичну узгодженість chaos_score із категоріями навігаційного ризику. Для повної вибірки статистика Краскела-Волліса становила 2083,59, а коефіцієнт Спірмена між chaos_score і severity_code дорівнював 0,465872403. На робастній підмножині, сформованій за умовою достатнього віконного покриття, коефіцієнт Спірмена зріс до 0,604712534 за $p < 10^{-300}$, що засвідчило посилення монотонного зв’язку після вилучення коротких або недостатньо представлених треків.

Отримані результати дали підстави розглядати chaos_score як статистично узгоджений проксі-індикатор траєкторної мікроваріативності, пов’язаної з рівнем навігаційного ризику. Водночас цей індекс потребує експертного визначення причини ризику, оскільки фактичний рух судна формувався під впливом режиму керування, гідрометеорологічних умов, типу району плавання, щільності трафіку, технічної якості даних і дій оператора.



а *б*

Рисунок 6.3. Розподіл індексів за рівнями навігаційного ризику: *а* – діаграма *chaos_score*; *б* – скрипкова діаграма комплементарного індексу *confidence_index*.

На рисунку 6.3 було зафіксовано зміщення значень chaos_score у бік більших величин для груп High і Critical порівняно з групою Low. Наявність часткового перекриття між групами була очікуваною, оскільки фрактальний індекс не виконував функцію самостійного класифікатора небезпеки. Його призначення полягало у формуванні кількісного індикатора для подальшого експертного, навігаційного та ризик-орієнтованого аналізу.

На окремому етапі експериментальної перевірки було оцінено робастність індексної моделі. Це було необхідно для усунення припущення, що високі значення chaos_score могли бути ознакою коротких проходів або недостатньої кількості фрактальних вікон. Для цього було сформовано робастну підмножину $Ф_{\geq 3}$, до якої були включені проходи, де індекс формувався не за одиничним фрагментом, а за сукупністю щонайменше трьох ковзних вікон.

Таблиця 6.5. Зведені характеристики робастної підмножини $Ф_{\geq 3}$

Показник	**Значення**
Загальна кількість проходів у робастній підмножині	4228
Кількість включених проходів	4226
Кількість виключених проходів	2
Мінімальний chaos_score	0
Максимальний chaos_score	0,537832034
Середній chaos_score	0,257191182
Медіана chaos_score	0,267300152
Мінімальний confidence_index	0,462167966

Продовження таблиці 6.5.

Максимальний confidence_index	1
Середній confidence_index	0,742808818
Медіана confidence_index	0,732699848

Порівняння повної вибірки та робастної підмножини показало, що інтерпретація індексів залишилася стійкою після вилучення коротких або недостатньо чітких проходів. Це вказує на те, що високі значення chaos_score не були лише наслідком малої кількості фрактальних вікон, а й відображали стійкі траєкторні патерни мікроваріативності керування рухом суден. Робастний аналіз також підтвердив, що зв'язок між chaos_score і атрибутами ризику зберігався не лише на повній вибірці, а й на підмножині проходів із достатнім віконним покриттям.

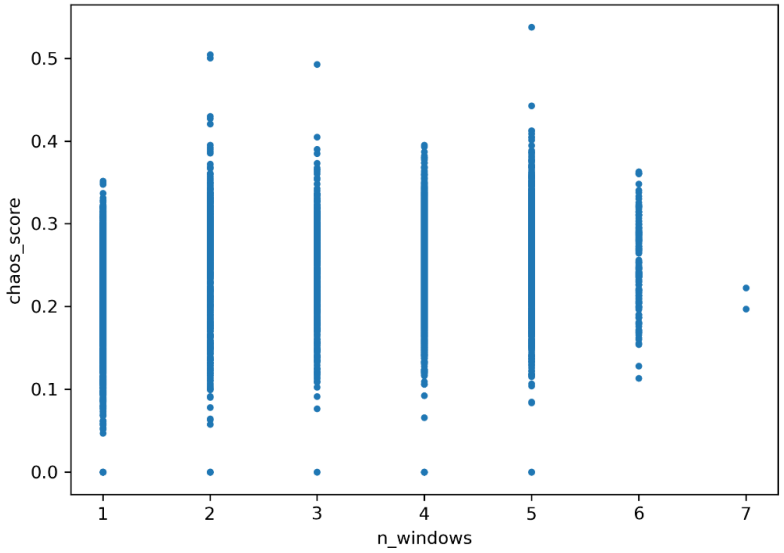


Рисунок 6.4. Залежність chaos_score від кількості ковзних вікон nwindows

Аналіз залежності, наведеної на рисунку 6.4, свідчить, що chaos_score не визначався лише за довжиною треку або кількістю ковзних вікон. Його змістовне призначення полягало у виявленні мікроваріативності траєкторної реалізації, яка зберігала інтерпретаційну стійкість за умов достатнього віконного покриття. Таким чином, індекс зберігає інтерпретаційну стійкість за достатнього віконного покриття; для коротких проходів необхідно окремо контролювати кількість доступних ковзних вікон.

file	n_windows	Higuchi_mean	Higuchi_std	Higuchi_max	DFA_mean	DFA_std	DFA_max	Katz_mean	Katz_std	Katz_max	Higuchi_mean_norm	Higuchi_std_norm	Higuchi_max_norm	DFA_mean_norm	DFA_std_norm
Small_AIS_2023_01_01_105	3	0.95449652	0.0076483	0.9632283	1.0513612	0.00583	1.0575	2.407548	0.19445	2.61146	0.765012277	0.019082499	0.744824636	0.06313521	0.002547166
Small_AIS_2023_01_01_109	3	0.9260497	0.0766718	0.9784831	1.0741576	0.15299	1.18127	2.575227	0.31747	2.93389	0.741437913	0.191295715	0.757645771	0.065123736	0.006848447
Small_AIS_2023_01_01_122	1	0.72666733	0	0.7266673	2.0413969	0	2.0414	1.682888	0	1.68289	0.576206356	0	0.546002962	0.149495664	0
Small_AIS_2023_01_01_123	1	0.94181074	0	0.9418107	1.8755438	0	1.87554	3.09307	0	3.09307	0.754499354	0	0.726823874	0.13502836	0
Small_AIS_2023_01_01_125	1	0.5672962	0	0.5672962	1.5163719	0	1.51637	1.442188	0	1.44219	0.444132794	0	0.412056805	0.103697927	0
Small_AIS_2023_01_01_200	4	0.79043713	0.0458484	0.8421627	4.930414	0.25664	5.29176	2.107711	0.29698	2.38455	0.629053472	0.114391513	0.643073004	0.401503569	0.112137017
Small_AIS_2023_01_01_205	5	0.28822061	0.1871587	0.5405769	1.6293898	0.17099	1.80694	1.533674	0.20533	1.77338	0.212858107	0.466959778	0.38960011	0.113556441	0.074711439
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.73717256	0	0.7371726	1.4821668	0	1.48217	1.693494	0	1.69349	0.58491222	0	0.554832262	0.100714228	0
Small_AIS_2023_01_01_205	1	1.0492413	0	1.0492413	1.2465864	0	1.24659	2.735193	0	2.73519	0.843528881	0	0.8171157	0.08016464	0
Small_AIS_2023_01_01_205	4	0.70693163	0.0218822	0.7245349	2.2537062	0.13613	2.36223	1.928876	0.05681	1.96497	0.559851046	0.054595904	0.544210721	0.168015323	0.05948148
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.96668512	0	0.9666851	0.7403233	0	0.74032	4.29881	0	4.29881	0.775113177	0	0.747729968	0.036003493	0
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.33855648	0	0.3385565	1.8580054	0	1.85801	1.499184	0	1.49918	0.254572298	0	0.21980864	0.133498491	0
Small_AIS_2023_01_01_205	5	0.43374673	0.0695384	0.4731692	1.7389357	0.05336	1.83004	1.522151	0.06419	1.62014	0.333458073	0.173498002	0.332946158	0.123112088	0.023313098
Small_AIS_2023_01_01_205	5	0.75863379	0.3143745	1.1454747	2.1816924	0.2361	2.49179	1.419998	0.20316	1.75556	0.602697501	0.784362628	0.897996699	0.161733588	0.103161046
Small_AIS_2023_01_01_205	2	0.93039446	0.0884496	0.9929378	1.1215611	0.0514	1.15791	2.808461	0.20903	2.95626	0.745038492	0.220681297	0.76979447	0.069258723	0.022460522
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.9943372	0	0.9943372	0.8095031	0	0.8095	4.499325	0	4.49933	0.798028925	0	0.770970626	0.04203802	0
Small_AIS_2023_01_01_205	4	0.92822253	0.0085921	0.9389663	2.231972	0.15885	2.39249	4.125518	0.43799	4.43351	0.743238574	0.021437266	0.724433242	0.166119463	0.069409457
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.96731282	0	0.9673128	1.4667347	0	1.46673	3.782435	0	3.78244	0.775633358	0	0.748257525	0.099368091	0
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.94807665	0	0.9480767	0.9087525	0	0.90875	3.156511	0	3.15651	0.759692023	0	0.732090167	0.050695509	0
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.79115252	0	0.7911525	2.0064437	0	2.00644	2.167239	0	2.16724	0.629646327	0	0.600200628	0.146446714	0
Small_AIS_2023_01_01_205	1	0.67716045	0	0.6771604	1.4467671	0	1.44677	2.074654	0	2.07465	0.535179158	0	0.504394063	0.097626325	0
Small_AIS_2023_01_01_205	2	0.66791428	0.0861498	0.7288314	1.8498862	0.11867	1.9338	1.561019	0.18026	1.68848	0.527516706	0.214943188	0.547821768	0.132790261	0.051852596
Small_AIS_2023_01_01_205	4	0.61267179	0.0216771	0.6371462	1.6471642	0.15146	1.78107	2.019629	0.09502	2.1523	0.481736311	0.054084275	0.470763449	0.11510689	0.066178742
Small_AIS_2023_01_01_210	1	0.96253254	0	0.9625325	1.0029931	0	1.00299	3.62682	0	3.62682	0.771671865	0	0.744239864	0.058916085	0
Small_AIS_2023_01_01_210	1	0.17995099	0	0.179951	1.936969	0	1.93697	1.3829	0	1.3829	0.12313323	0	0.086505974	0.140386461	0
Small_AIS_2023_01_01_210	4	0.64621918	0.0878081	0.7317522	1.6436291	0.10427	1.77799	1.575734	0.24709	1.72414	0.509537605	0.219080655	0.5502766	0.114798527	0.045561507
Small_AIS_2023_01_01_210	1	0.50272968	0	0.5027297	1.5724095	0	1.57241	2.1897	0	2.1897	0.390625419	0	0.35779078	0.108586067	0
Small_AIS_2023_01_01_210	1	0.98222119	0	0.9822212	0.6372157	0	0.63722	4.151033	0	4.15103	0.787988179	0	0.760787518	0.027009455	0
Small_AIS_2023_01_01_211	4	0.96344223	0.069	1.0440339	1.4432601	0.05407	1.50412	2.929308	0.73598	3.70414	0.77242574	0.172154678	0.812739097	0.097320409	0.023625235
Small_AIS_2023_01_01_211	1	0.92560659	0	0.9256066	0.8553213	0	0.85532	3.194537	0	3.19454	0.741070702	0	0.713204825	0.046034725	0
Small_AIS_2023_01_01_211	1	1.01011993	0	1.0101199	0.8547913	0	0.85479	2.614645	0	2.61464	0.811108341	0	0.784235487	0.045988496	0
Small_AIS_2023_01_01_211	1	0.58384381	0	0.5838438	1.4438149	0	1.44381	2.222708	0	2.22271	0.457846081	0	0.425964525	0.097368806	0
Small_AIS_2023_01_01_211	1	0.9822111	0	0.9822111	0.9097993	0	0.9098	2.419029	0	2.41903	0.787979822	0	0.760779042	0.050786825	0
Small_AIS_2023_01_01_211	1	1.04901987	0	1.0490199	1.0464128	0	1.04641	3.036174	0	3.03617	0.843345377	0	0.816929594	0.062703565	0
Small_AIS_2023_01_01_212	1	0.86332822	0	0.8633282	1.5465405	0	1.54654	2.657564	0	2.65756	0.689459557	0	0.660861915	0.10632952	0

A_max_no	mean_no	tz_std_no	tz_max_no	haos_scor	fidence_in	fidence_la	n_points	dt_sec	mode_geo	iguchi_CO	iguchi_RO	iguchi_XT	DFA_COG	DFA_ROT	DFA_XTE	Katz_COG	Katz_ROT	Katz_XTE	trosian_CO	trosian_RO	trosian_XT	D_path_2
0.06367	0.17607	0.04486	0.20157	0.24106	0.75894	High confi	149	1	latlon_dec	0.4941	0.95152	0.94401	1.48691	0.88374	1.03148	1.97136	2.99535	2.28211	1.04709	1.03997	1.04615	0.5141
0.07447	0.19704	0.07324	0.24191	0.29283	0.70717	High confi	82	1	latlon_decimal_forced			0.94197			1.08716	1	1	2.65834	1	1	1.04416	0.53188
0.1495	0.08542	0	0.08542	0.17527	0.82473	High confi	53	1	latlon_dec	0.42009	0.9712	0.8587	1.84812	1.61097	1.75237	1.47016	2.10816	1.55405	1.05074	1.04201	1.03671	0.40393
0.13503	0.26182	0	0.26182	0.24622	0.75378	High confi	55	1	latlon_dec	0.55217	1.00264	0.9643	5.22971	4.5736	1.73211	1.75184	1.85906	3.46782	1.02133	1.02824	1.06484	0.05651
0.1037	0.05531	0	0.05531	0.13061	0.86939	High confi	121	1	latlon_dec	0.92078	1.04333	0.56758	0.76787	0.5528	1.51637	2.85684	3.74248	1.44275	1.0472	1.04169	1.0472	0.7568
0.43302	0.13856	0.06851	0.17319	0.28847	0.71153	High confi	152	1	latlon_dec	0.36065	0.90074	0.78979	1.74733	1.05354	5.07821	1.73449	2.11433	1.91233	1.03766	1.04325	1.0414	0.08333
0.12904	0.06676	0.04737	0.09674	0.22113	0.77887	High confi	112	1	latlon_dec	0.87393	1.08902	0.27787	0.88342	0.58401	1.77384	2.49472	2.21643	1.73415	1.05164	1.04562	1.03677	0.78826
0.10071	0.08675	0	0.08675	0.17125	0.82875	High confi	55	1	latlon_dec	0.48186	1.01246	0.69423	1.39296	0.84073	1.4035	1.7577	3.8595	1.72932	1.05672	1.0518	1.04517	0.55582
0.08016	0.21705	0	0.21705	0.255	0.745	High confi	56	1	latlon_dec	0.96002	1.00942	1.05479	3.07673	1.04636	1.40808	2.63175	2.88672	2.74367	1.06502	1.04582	1.04582	0.43606
0.17748	0.11619	0.01311	0.12071	0.20095	0.79905	High confi	157	1	latlon_dec	0.69629	0.92798	0.72343	1.37598	1.12293	2.06193	2.00435	2.52969	1.87814	1.05484	1.04479	1.04212	0.84948
0.036	0.41264	0	0.41264	0.26148	0.73852	High confi	51	1	latlon_dec	0.02263	0.75053	0.95827	4.0116	8.39487	0.74032	1.16075	1.77768	4.25424	1.03475	1.03849	1.06752	0.35065
0.1335	0.06244	0	0.06244	0.08689	0.91311	High confi	61	1	latlon_dec	0.4706	1.02364	0.36309	2.98186	3.67507	1.7819	1.32193	2.11211	1.48746	1.03538	1.03982	1.03389	0.60498
0.13106	0.06531	0.01481	0.07757	0.15327	0.84673	High confi	160	1	latlon_dec	0.37584	0.97552	0.48175	3.40107	1.84013	1.74546	1.51104	2.37654	1.82113	1.049	1.04469	1.03505	0.79991
0.18878	0.05254	0.04687	0.09451	0.41271	0.58729	Moderate	98	1	latlon_dec	0.83891	1.04147	0.77825	2.1508	1.10017	1.95524	1.63908	2.14244	1.41635	1.05799	1.05253	1.03818	0.77867
0.07243	0.22622	0.04822	0.24471	0.29452	0.70548	High confi	62	1	latlon_decimal_forced			0.92214	0.28651		1.04031	1	1	3.27277	1	1	1.05048	0.44122
0.04204	0.43772	0	0.43772	0.27201	0.72799	High confi	52	1	latlon_decimal_forced			1.01571	0.40328		0.73534	1	1	4.59673	1	1	1.06421	0.34531
0.18012	0.39097	0.10104	0.42949	0.3006	0.6994	Moderate	159	1	latlon_decimal_forced			0.93974			1.59882	1	1	3.69631	1	1	1.04935	0.09238
0.09937	0.34805	0	0.34805	0.26013	0.73987	High confi	51	1	latlon_dec	0.39464	1.02299	0.95295	11.1214	6.11106	1.46673	1.31714	2.78615	2.92707	1.04588	1.04219	1.0568	0.51896
0.0507	0.26975	0	0.26975	0.23759	0.76241	High confi	59	1	latlon_decimal_forced			0.94253	0.47099		1.02868	1	1	3.38199	1	1	1.0551	0.40719
0.14645	0.14601	0	0.14601	0.19789	0.80211	High confi	52	1	latlon_dec	0.23335	0.93189	0.79024	4.31082	1.26227	1.91647	1.56159	2.27513	2.28707	1.0537	1.03939	1.03939	0.56738
0.09763	0.13443	0	0.13443	0.16534	0.83466	High confi	59	1	latlon_dec	0.92107	1.02547	0.6393	0.28169	0.4563	1.40142	1	1.20481	1.73574	1.00331	1.00496	1.04605	0.6768
0.14011	0.07018	0.04158	0.08612	0.22378	0.77622	High confi	72	1	latlon_dec	0.29374	1.00536	0.65762	1.80845	1.30254	1.75797	1.40761	2.94596	1.43957	1.04453	1.04923	1.04097	0.54932
0.12679	0.12754	0.02192	0.14414	0.1798	0.8202	High confi	156	1	latlon_dec	0.97254	1.04672	0.58976	0.64266	0.49396	1.75122	7.39546	4.60472	1.98559	1.04999	1.04333	1.04243	0.79726
0.05892	0.32858	0	0.32858	0.25077	0.74923	High confi	60	1	latlon_dec	0.23332	0.95374	0.98157	1.65484	0.82849	0.84159	1.47252	2.4783	3.33709	1.05545	1.04957	1.05691	0.42654
0.14039	0.0479	0	0.0479	0.05176	0.94824	High confi	58	1	latlon_dec	0.18806	0.98018	0.15363	1.54543	0.83463	1.93821	1.42903	3.70607	1.44876	1.06232	1.05929	1.0392	0.63481
0.12652	0.07202	0.057	0.09058	0.22341	0.77659	High confi	94	1	latlon_dec	0.89881	0.90267	0.60102	0.96246	0.72482	1.7757	2.02929	2.31114	1.6745	1.05269	1.04602	1.04602	0.77366
0.10859	0.14882	0	0.14882	0.13181	0.86819	High confi	52	1	latlon_dec	0.33191	1.03991	0.49238	1.39179	0.85068	1.63917	2.20223	3.71398	2.19437	1.05016	1.043	1.0537	0.48855
0.02701	0.39416	0	0.39416	0.26077	0.73923	High confi	61	1	latlon_decimal_forced			0.97275			0.54826	1	1	4.4211	1	1	1.05579	0.41157
0.10263	0.24133	0.16978	0.33826	0.32692	0.67308	Moderate	97	1	latlon_dec	0.68087	1.02078	0.90968	3.74128	4.03658	2.16972	2.92888	4.02071	2.77462	1.06337	1.05396	1.05554	0.03459
0.04603	0.27451	0	0.27451	0.23291	0.76709	High confi	58	1	latlon_dec	0.55811	1.00305	0.97536	4.86078	1.5489	0.70749	1.84845	2.35567	3.30609	1.01834	1.0216	1.05319	0.29103
0.04599	0.20197	0	0.20197	0.23982	0.76018	High confi	55	1	latlon_dec	0.81298	1.03149	0.95317	1.50591	0.97992	1.01604	2.73477	3.51396	2.64697	1.06323	1.05998	1.06645	0.39758
0.09737	0.15295	0	0.15295	0.14824	0.85176	High confi	56	1	latlon_decimal_forced			0.52472			1.38111	1	1	2.22755	1	1	1.04255	0.51812
0.05079	0.1775	0	0.1775	0.23076	0.76924	High confi	52	1	latlon_decimal_forced			0.98939	0.40328		0.88011	1	1	2.42538	1	1	1.06421	0.35219
0.0627	0.2547	0	0.2547	0.2584	0.7416	High confi	55	1	latlon_decimal_forced			1.0533			1.03507	1	1	3.1187	1	1	1.05672	0.22059
0.10633	0.20734	0	0.20734	0.21735	0.78265	High confi	59	1	latlon_dec	0.55804	1.00876	0.83825	7.25529	3.63996	1.35269	1.83824	2.57216	2.7441	1.043	1.0536	1.04757	0.30321

Рисунок 6.5. Фрагмент вихідного табличного звіту з інтегральними індексами та текстовими рекомендаціями

Завершальним етапом перевірки стало геоінформаційне подання результатів фрактально-епізодного аналізу. Цей модуль замкнув цикл обробки: від нормалізованих AIS/ECDIS-траєкторій до фрактальних вікон, епізодів, інтегральних індексів, інтерактивної карти та автоматизованих рекомендацій. У вихідному табличному звіті були зафіксовані основні ідентифікатори проходів, значення chaos_score, confidence_index, кількість вікон, категорії ризику та текстові рекомендації.

Фрагмент вихідного звіту, наведений на рисунку 6.5, демонструє, що результат фрактально-епізодної обробки поданий не лише у вигляді внутрішніх числових змінних, а як структурований аналітичний звіт,

придатний для подальшого використання в експертних системах та ІСНЗ, тренажерній роботі та внутрішньому аудиті якості навігації. Саме на цьому рівні математичну процедуру реалізовано у вигляді прикладного інформаційного продукту ІСНЗ.

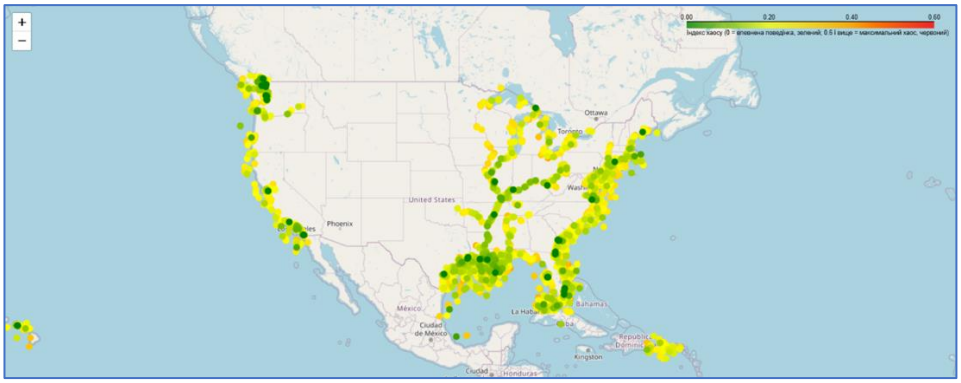


Рисунок 6.6. Оглядова інтерактивна карта AIS/ECDIS-траєкторій із кольоровим кодуванням індексу chaos_score

Оглядова інтерактивна карта забезпечила просторове подання результатів аналізу та дала змогу виявити траєкторії з підвищеною мікроваріативністю на рівні району плавання. Кольорове кодування chaos_score дозволило локалізувати проходи, які потребували додаткової експертної, навігаційної або ризик-орієнтованої інтерпретації. Завдяки цьому фрактальний індекс було включено до просторового контексту, що має принципове значення для розв’язання задач навігаційного забезпечення.

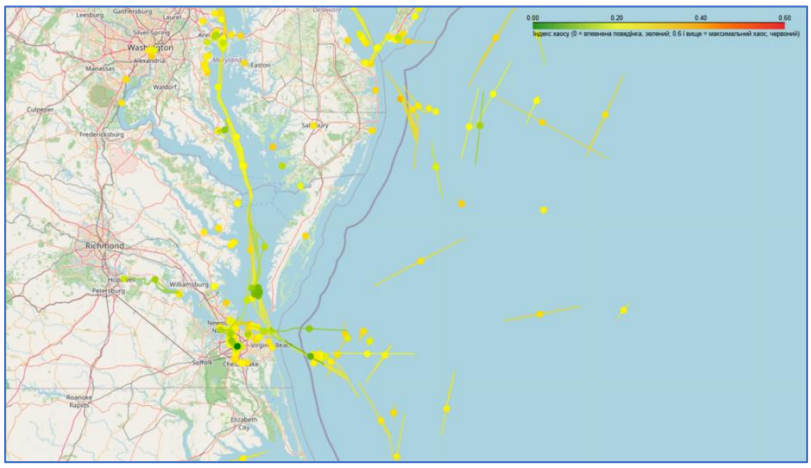


Рисунок 6.7. Збільшений фрагмент інтерактивної карти AIS/ECDIS-траєкторій у прибережній або портовій зоні

Фрагмент карти підтвердив прикладну придатність методу для аналізу портових, прибережних і обмежених акваторій, де навіть незначні зміни курсу, швидкості або поперечного відхилення могли мати суттєве навігаційне значення. Просторова деталізація результатів дала змогу перейти від загального статистичного висновку до локалізованого аналізу конкретних ділянок траєкторії руху.

Апробація програмного комплексу була виконана як експериментальна перевірка цілісного аналітичного циклу. У межах цього циклу первинні AIS/ECDIS-дані були перетворені на нормалізовані траєкторні ряди, далі – на локальні фрактальні ознаки, потім – на інтегральні індекси chaos_score і confidence_index, після чого результати були статистично перевірені, візуалізовані на карті та подані у формі табличного звіту з рекомендаціями.

У результаті було підтверджено, що фрактально-епізодний аналіз забезпечив вимірюваність траєкторної мікроваріативності AIS/ECDIS-проходів, статистичну узгодженість цієї мікроваріативності з рівнями навігаційного ризику, робастність індексної моделі за умов достатнього віконного покриття та прикладну придатність результатів для подальшого використання в ІСНЗ. Водночас межі інтерпретації залишалися чітко визначеними: отримані індекси характеризували траєкторну структуру руху судна та могли бути пов’язані з проявами людського фактора лише після зіставлення з додатковими зовнішніми змінними – режимом керування, умовами плавання, експертною розміткою, журналами маневрів і контекстом навігаційної ситуації.

Отже, було експериментально підтверджено працездатність фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій як інструмента оцінювання мікроваріативності руху судна. Отримані результати підтвердили один із ключових етапів дисертаційного дослідження: перехід від первинних навігаційних даних до кількісних, статистично перевірених і просторово інтерпретованих індикаторів, придатних для використання в контурі ергатичних систем навігаційного забезпечення. Наступним етапом є експертне

оцінювання відповідності фактичної ECDIS-траєкторії експертно-заданого профілю руху судна .

6.3. Експертне оцінювання ECDIS-відхилень від експертно-заданого профілю руху судна

Після експериментальної верифікації фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій було виконано другий рівень перевірки – експертне оцінювання відповідності фактичної ECDIS-траєкторії експертно-заданого профілю руху судна [204, 355]. Експертне оцінювання ECDIS-відхилень було використано як проміжний доказовий рівень між аналізом траєкторної структури та подальшою діагностикою дій оператора [207, 309, 312]. Його призначення полягало у кількісному оцінюванні того, наскільки фактична траєкторія відповідала експертно-заданому профілю за координатними, швидкісними, курсовими та статистичними параметрами.

Вхідною інформацією для експертного оцінювання була ECDIS-траєкторія судна, подана у вигляді послідовності координат, часових міток, швидкості, курсу та інших доступних навігаційних параметрів. Для кожного проходу було сформовано набір контрольних точок, у яких фактичні значення порівнювали з експертно-заданим. Експертно-заданий профіль у цій процедурі виконував функцію навігаційної основи для порівняння.

Експертно-задана верифікація доповнює фрактально-епізодний аналіз зовнішнім навігаційним критерієм. Якщо chaos_score характеризує внутрішню мікроваріативність траєкторії, то ECDIS-оцінювання визначає відповідність фактичного проходу експертно-заданому профілю.

Для *k*-го проходу задаються фактичний та експертно-заданий профілі:

$$P_{fact}^{(k)} = \{ p_{fact,l}^{(k)} \}_{l=1}^{M_k}, \; P_{ref}^{(k)} = \{ p_{ref,l}^{(k)} \}_{l=1}^{M_k}. \tag{6.9}$$

Локальне просторове відхилення визначається як:

$$\Delta r_l = \sqrt{(x_{fact,l} - x_{ref,l})^2 + (y_{fact,l} - y_{ref,l})^2}. \tag{6.10}$$

Курсове відхилення обчислюється з урахуванням циклічної природи курсу:

$$\Delta\psi_l = \min\left(|\psi_{fact,l} - \psi_{ref,l}|, 360^\circ - |\psi_{fact,l} - \psi_{ref,l}|\right). \quad (6.11)$$

Узагальнений вектор ECDIS-відхилень має вигляд:

$$D_{ECDIS}^{(k)} = \left(\overline{\Delta r}^{(k)}, \Delta r_{max}^{(k)}, \sigma_{\Delta r}^{(k)}, \overline{\Delta V}^{(k)}, \overline{\Delta\psi}^{(k)}\right). \quad (6.12)$$

На його основі формується інтегральна оцінка проходу:

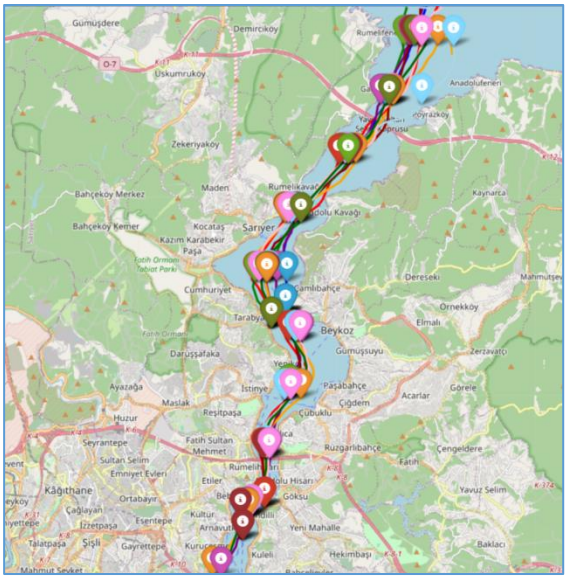
$$Q_{ECDIS}^{(k)} = f(D_{ECDIS}^{(k)}), \qquad Q_{ECDIS}^{(k)} \in [0;100],$$

де менші значення відповідають більшій невідповідності експертно-заданому профілю.

Формальний перехід цього рівня має вигляд:

$$S^{(k)} \to (P_{fact}^{(k)}, P_{ref}^{(k)}) \to D_{ECDIS}^{(k)} \to Q_{ECDIS}^{(k)}. \quad (6.13)$$

Спільне використання C_{chaos} і $Q_{ECDIS}^{(k)}$ дає змогу розмежувати внутрішню нерегулярність траєкторії та її реальну навігаційну значущість [300]. Підвищений chaos_score за зниженого Q_{ECDIS} вказує на фрагмент, що потребує експертного розбору; підвищений chaos_score без суттєвого зниження Q_{ECDIS} може пояснюватися допустимою складністю маневру або особливостями району плавання. Практичне використання результату полягає у кількісній оцінці якості проходу, локалізації проблемних ділянок, поясненні причин зниження оцінки та підготовці матеріалів для тренажерного або інструкторського аналізу.



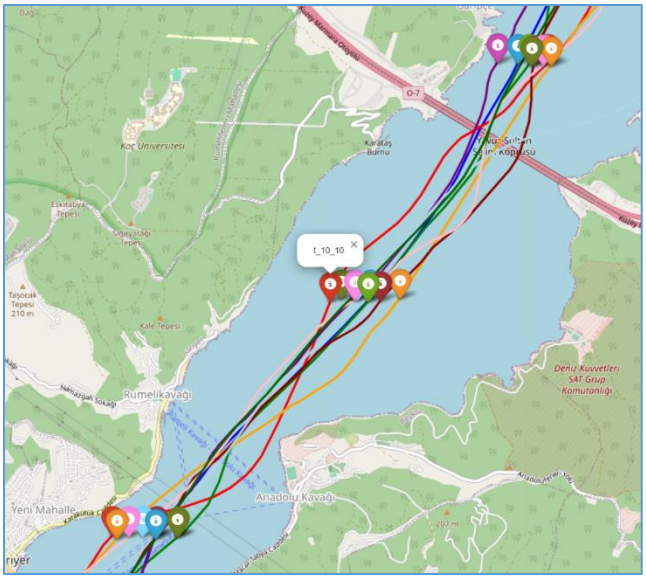




Рисунок 6.8. Візуалізація ECDIS-траєкторій суден для подальшого експертного оцінювання

На рисунку 6.8 було подано просторове відображення ECDIS-траєкторій, використаних для подальшого експертного оцінювання. Така візуалізація дала змогу перейти від табличного подання координат до просторового аналізу профілю руху, локалізувати ділянки потенційних відхилень і підготувати основу для зіставлення фактичних параметрів проходу з експертно-заданими контрольними точками. У межах експертного оцінювання було використано такі параметри: координатне відхилення, відхилення швидкості, відхилення курсу, середнє абсолютне відхилення, максимальне відхилення, стандартне відхилення та підсумкова інтегральна оцінка. Вони дали змогу перейти від набору локальних розбіжностей до узагальненої оцінки якості проходу. Стандартне відхилення при цьому трактувалося як кількісна ознака нестабільності виконання навігаційного завдання відносно експертно-заданому профілю.

Після розрахунку відхилень автоматизована експертна система сформувала інтегральну оцінку відповідності фактичної траєкторії експертно-заданому профілю. Початковий бал приймався рівним 100, після чого, у разі перевищення встановлених порогів, віднімалися штрафні бали. Така логіка, побудована на системі правил, забезпечила прозорість оцінювання, оскільки дала змогу пояснити, за рахунок яких саме відхилень знижувалася оцінка проходу.

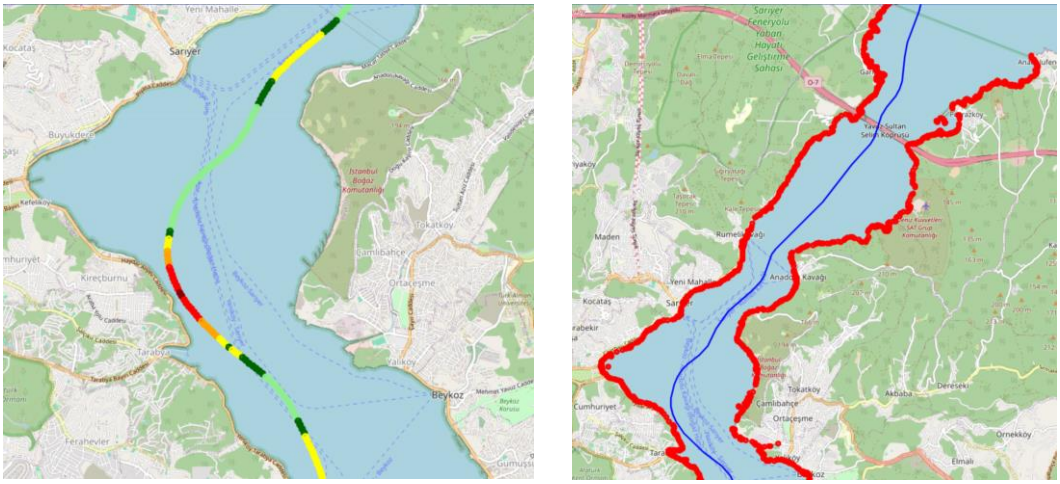


Рисунок 6.9. Візуалізація траєкторій на інтерактивній карті за рівнем безпеки

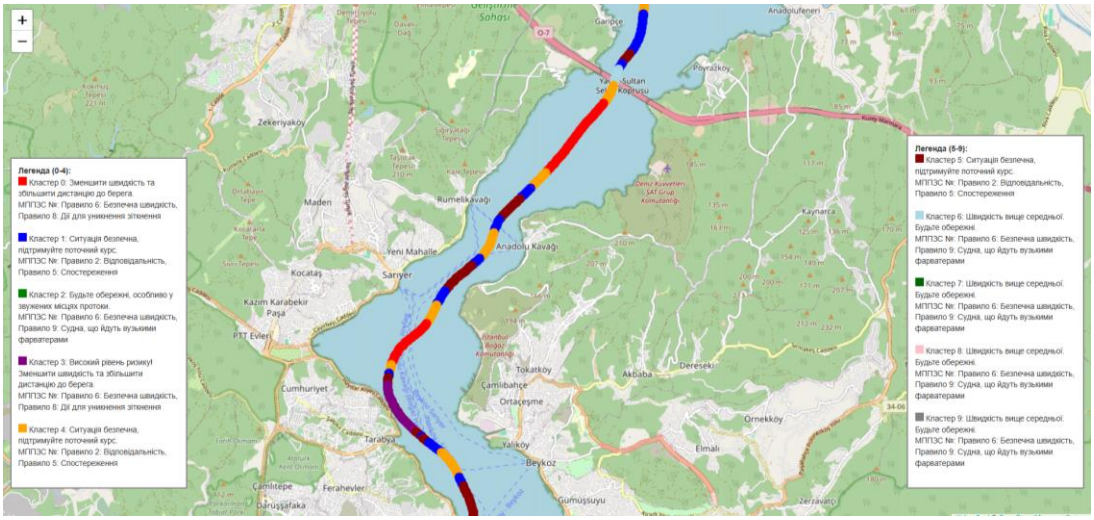


Рисунок 6.10. Формування інтерактивних карт експертної оцінки ECDIS-траєкторій

Рисунки 6.9 і 6.10 підтвердили, що експертне оцінювання було реалізоване не лише у розрахунковій формі, а й у вигляді інтерактивного просторового подання. Це дало змогу співвіднести числову оцінку з конкретними ділянками руху судна та показати, де саме виникали невідповідності експертно-заданому профілю.

Таблиця 6.6. Структура параметрів експертного оцінювання ECDIS-відхилень

Параметр	Зміст	Інтерпретація
Просторове відхилення	Евклідова відстань між фактичною та експертно-заданими координатами у контрольній точці	Просторова невідповідність фактичної траєкторії експертно-заданому профілю

Продовження таблиці 6.6.

Відхилення швидкості	Різниця між фактичною та експертно-заданою швидкістю	Ознака невідповідності режиму руху очікуваному профілю
Відхилення курсу	Різниця між фактичним і експертно-заданим курсом	Ознака локальної зміни напряму або нестійкості утримання курсу
Середнє абсолютне відхилення	Середній рівень відхилення за контрольними точками	Узагальнена міра відповідності проходу експертно-заданому
Максимальне відхилення	Найбільше локальне відхилення	Індикатор потенційно критичного фрагмента проходу
Стандартне відхилення	Розкид локальних відхилень	Непряма ознака нестабільності виконання навігаційного завдання
Підсумкова оцінка	Інтегральна оцінка у шкалі 0–100	Порівняльна оцінка якості проходу або файлу



Рисунок 6.11. Структура автоматизованої експертної системи оцінювання ECDIS-відхилень траєкторії руху судна

На рисунку 6.11 відображено послідовність роботи експертної системи: завантаження ECDIS-даних, очищення та нормалізація даних, вибір ключових точок, порівняння з експертно-заданим профілем, розрахунок відхилень, формування інтегральної оцінки та візуалізація результату. Така структура підтвердила, що експертне оцінювання було реалізовано як прикладний програмний модуль у складі ІСНЗ.

Візуалізація результатів стала необхідною умовою практичного використання експертної системи. Просторове подання ECDIS-траєкторій дало змогу встановити, де саме виникали відхилення від експертно-заданого профілю, а графічне подання параметрів руху забезпечило можливість зіставлення цих відхилень із динамікою курсу, швидкості та часовими характеристиками проходу.

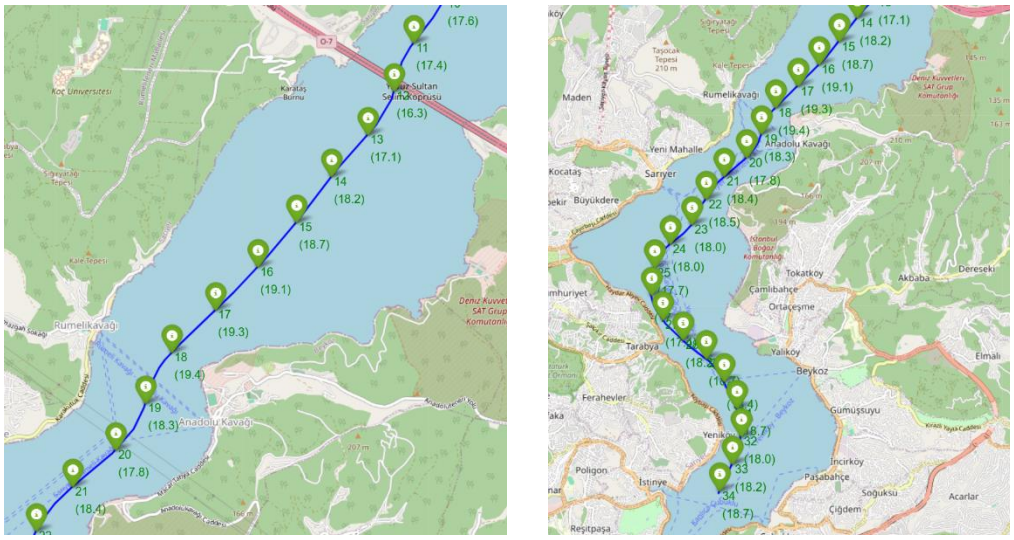
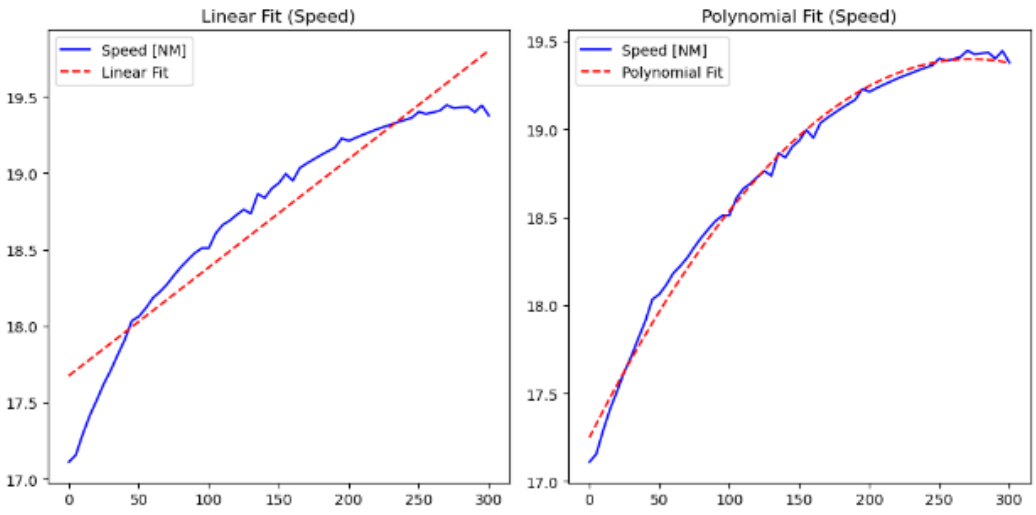


Рисунок 6.12. Візуалізація ECDIS-траєкторій на контрольних проміжках 13–18 хв та 18–24 хв у протоці Босфор

На рисунку 6.12 було подано візуалізацію траєкторій на двох контрольних проміжках руху судна у протоці Босфор. Це підтвердило можливість локального аналізу проходу не лише на рівні всього маршруту, а й на рівні окремих часових інтервалів, де відхилення могли мати навігаційне значення.



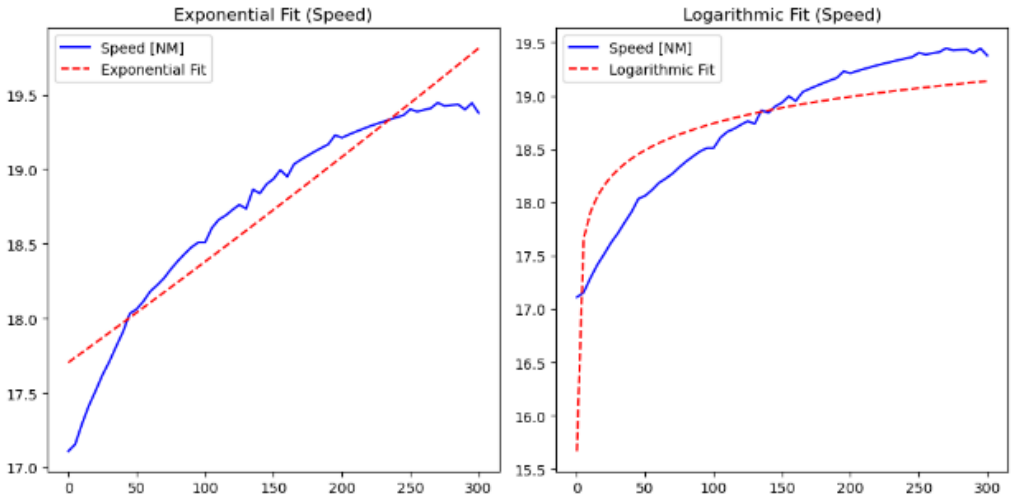


Рисунок 6.13. Графіки автоматизованого аналізу параметрів руху судна на контрольних проміжках ECDIS-траєкторії

На рисунку 6.13 просторову візуалізацію доповнено графічним поданням параметрів руху судна. Це посилило доказовість експертної системи, оскільки результат оцінювання був представлений не тільки на карті, а й у вигляді графіків, які відображали зміну параметрів руху на контрольних ділянках.

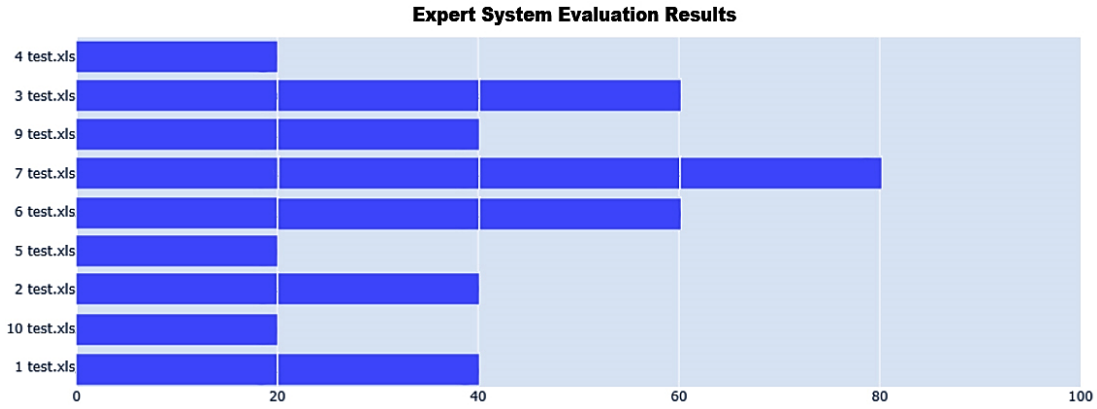


Рисунок 6.14. Візуалізація підсумкових оцінок експертної системи аналізу ECDIS-траєкторій

На рисунку 6.14 відображено результати порівняння кількох експериментальних проходів за підсумковими оцінками експертної системи та визначено траєкторії, які потребували додаткової уваги, повторного аналізу або коригування тренажерної підготовки операторів.

При цьому відхилення від експертно-заданого профілю не трактувалося як автоматичний доказ помилки оператора. Воно могло бути зумовлене

навігаційним контекстом, зовнішніми умовами, діями інших суден, особливостями сценарію, режимом керування, якістю даних або цілеспрямованим маневром. Тому експертна система виконувала не функцію остаточного судження про причини відхилення, а функцію формалізованого виявлення ділянок, які потребували професійного аналізу.

Для забезпечення наукової коректності результати експертного оцінювання були інтерпретовані на трьох рівнях. На *траєкторному рівні* фіксувалися вимірювані або розрахункові відхилення координат, швидкості, курсу та часу проходження контрольних точок. На *операційному рівні* ці відхилення розглядалися як ознаки нестабільності виконання навігаційного завдання або невідповідності режиму руху експертно-заданому профілю [306, 315, 318, 324]. На *кваліфікаційно-поведінковому рівні* вони використовувалися як підстава для припущення щодо потреби в додатковому аналізі дій окремого оператора.

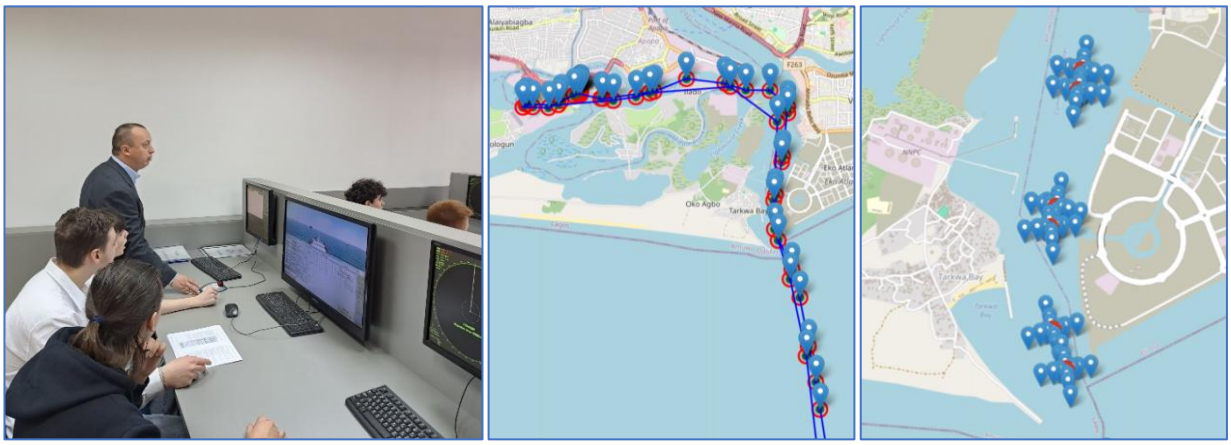


Рисунок 6.15. Візуалізація маркерів на інтерактивній карті для експертної оцінки ECDIS-траєкторії у тренажерному центрі Англо-Істерн Україна.

На рисунку 6.15 відображено процес експертного аналізу експериментальних проходів, деталізованих до рівня окремих маркерів на інтерактивній карті. Це має прикладне значення для локалізації проблемних ділянок траєкторії, пояснення причин зниження підсумкової оцінки та формування матеріалу для подальшого тренажерного або інструкторського аналізу. У такому вигляді експертне оцінювання ECDIS-відхилень було включено до загальної логіки ІСНЗ. Воно забезпечило кількісну та візуальну

основу для фіксації відхилень фактичного проходу від експертно-заданого профілю руху судна.

Таким чином, було експериментально підтверджено працездатність експертної системи оцінювання ECDIS-відхилень [300]. Було показано, що фактична траєкторія судна могла бути зіставлена з експертно-заданим профілем за системою координатних, швидкісних, курсових і статистичних параметрів; інтегральна оцінка забезпечила порівняльну характеристику якості проходу; а картографічне та графічне подання результатів зробило оцінку придатною для тренажерного розбору і подальшого використання в ІСНЗ. Це підтвердило другий доказовий рівень: перехід від виявлення мікроваріативності траєкторії до формалізованого оцінювання її відповідності експертно-заданому навігаційному профілю.

6.4. Експериментальна ідентифікація просторово-часових патернів уваги оператора та прогнозування переходів між просторами сприйняття в контурі ІСНЗ

Після експериментальної перевірки фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій та експертного оцінювання ECDIS-відхилень було виконано подальший рівень верифікації – експериментальну діагностику функціональних станів оператора як активного елемента ергатичної системи навігаційного забезпечення. У цьому підрозділі було перевірено можливість включення до контуру ІСНЗ непрямих ознак функціонального стану оператора, що проявлялися у траєкторних, часових, поведінкових, фізіологічних і термографічних даних. Такий перехід є принципово важливим для завершальної експериментальної логіки дослідження. У попередніх розділах було обґрунтовано, що людський фактор не виступав зовнішнім поясненням відхилень, а був внутрішнім функціональним компонентом ергатичного контуру керування. Відповідно, стан оператора, розподіл уваги, часові характеристики мікрооперацій, повторні звернення до навігаційних засобів і якість реалізації керувальних дій були розглянуті як взаємопов’язані змінні операторського контуру.

Операторсько-часова верифікація забезпечує перехід від траєкторного та експертно-заданого аналізу до оцінювання стану оператора як активного елемента ІСНЗ. Основою є перехід:

$$X(t) \to Z(t) \to \hat{S}(t) \to \hat{R}(t + \Delta t), \tag{6.14}$$

де $X(t)$ включає навігаційні, часові, поведінкові та керувальні спостереження, а $Z(t)$ – їх нормоване ознакове подання.

Розподіл уваги оператора подається як:

$$W(t) = \left(w_1(t), ..., w_n(t)\right), \ \sum_{i=1}^{n} w_i(t) = 1, \quad w_i(t) \geq 0. \tag{6.15}$$

Вага каналу визначається через інтенсивність його залучення:

$$w_i(t) = \frac{g_i(t)}{\sum_{k=1}^{n} g_k(t)}, \tag{6.16}$$

де $g_i(t)$ формується за частотою звернення, тривалістю роботи з каналом, кількістю перемикань уваги та ситуаційною значущістю каналу.

Часова організація дій оператора описується матрицею інтенсивностей переходів: $\lambda_{ij} = \frac{N_{ij}}{T_i}, \qquad i \neq j$, де N_{ij} – кількість переходів зі стану S_i до S_j, T_i – сумарний час перебування у стані S_i. Матриця $\mathbf{\Lambda} = \{\lambda_{ij}\}$ характеризує темп переходів між фазами операторського циклу: оцінюванням ситуації, оцінюванням ризику, вибором стратегії, формуванням дій і виконанням маневру.

Зміна рівня деталізації сприйняття навігаційної ситуації описується графовою моделлю p-го рівня $G_p = \left(V_p, E_p\right)$, та оператором переходу:

$$\Pi_{p \to q} : G_p \to G_q, \qquad q \in \{p - 1, p, p + 1\}. \tag{6.17}$$

Ентропійна характеристика вибору альтернатив задається як:

$$H_s(t) = -\sum_{a \in A_s} \hat{p}_a(t) \ln \hat{p}_a(t). \tag{6.18}$$

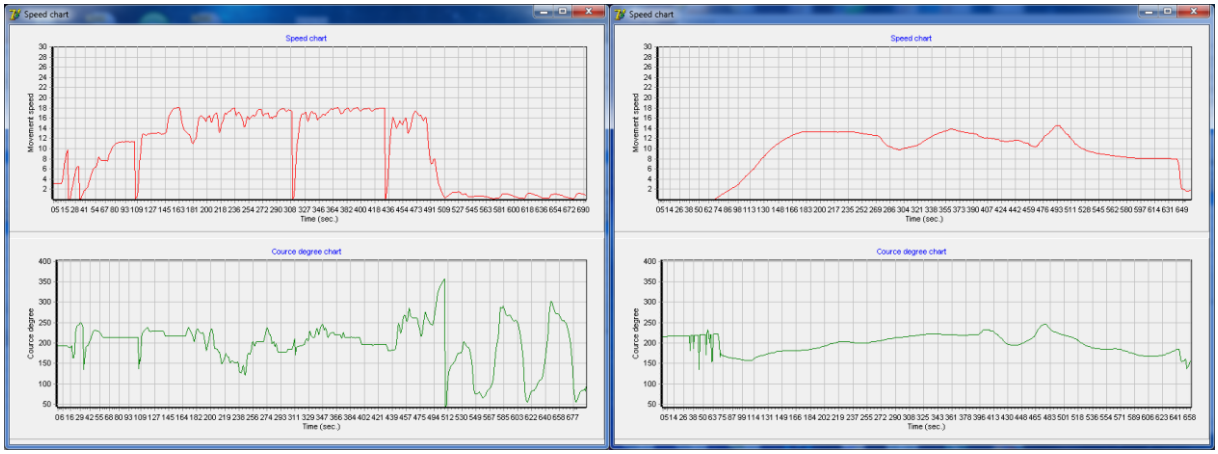
Зростання $H_s(t)$ вказує на підвищення невизначеності або втрату стійкого шаблону дій.

Узагальнений операторсько-часовий перехід має вигляд:

$$Z(t) \to W(t), \Lambda, G_p, H_s(t) \to \hat{S}(t) \to \hat{R}(t + \Delta t). \qquad (6.19)$$

Практичне використання результату полягає у виявленні дисбалансу уваги, часових затримок, повторних переходів між фазами дій, спрощення або деталізації простору сприйняття, а також у ранньому прогнозуванні напруженого або критичного режиму ІСНЗ.

Експериментальна діагностика в цьому підрозділі була побудована як інженерно-системне виявлення непрямих ознак функціонального стану в контурі ІСНЗ. Доказове значення полягає в тому, що система дала змогу зіставити параметри руху судна, дії та функціональний стан оператора в одному експериментальному полі. Дані для цього етапу були отримані з використанням навігаційного тренажера Navi-Trainer Professional 5000, експериментальний паспорт якого було подано у пункті 6.1. У межах цього підрозділу тренажерне середовище було використано як контрольовану базу для фіксації часових і поведінкових характеристик оператора, параметрів руху судна, взаємодії з ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, GPS та органами керування.



а *б*

Рисунок 6.16. Відмінності у кривизні траєкторії під час проходження протоки Босфор

На рисунку 6.16 було подано приклад траєкторних відмінностей, зафіксованих під час проходження складної ділянки. Порівняння параметрів руху показало, що за формально подібних умов оператори продемонстрували різну кривизну траєкторії та різний характер реакцій. У межах

експериментальної інтерпретації ці відмінності були використані як траєкторні індикатори зміни характеру керування, які потребували зіставлення з часовими, поведінковими та контекстними даними.

Одним із базових компонентів діагностики функціонального стану оператора був розподіл уваги між функціонально значущими інформаційними та керувальними каналами ходового містка. У межах експериментального аналізу увага оцінювалася за такими спостережуваними ознаками: частотою звернень до джерел інформації, тривалістю роботи з ними, послідовністю перемикань, повторними уточненнями, часовими затримками та ситуаційною значущістю відповідного каналу.

Таблиця 6.7. Операційні канали уваги оператора в контурі ІСНЗ

Канал	**Зміст каналу**	**Джерело даних**	**Роль у моделі**
v_1	Візуальне спостереження	Візуальний контроль, відеофіксація, журнал спостережень	Первинне сприйняття навігаційної ситуації
v_2	ECDIS	Електронна карта, маршрут, трек, XTE	Контроль положення судна та відповідності плану переходу
v_3	RADAR/ARPA	Радіолокаційні цілі, CPA/TCPA	Оцінювання небезпечного зближення
v_4	AIS	Ідентифікаційні дані цілей	Уточнення характеристик навколишнього трафіку
v_5	VHF-комунікація	Переговори, команди, підтвердження	Координація з іншими суднами та службами
v_6	Органи керування	Штурвал, машинний телеграф, автопілот	Реалізація керувального впливу
v_7	Зовнішнє середовище	Видимість, трафік, погода, навігаційні обмеження	Контекст прийняття рішень
v_8	Командна взаємодія	Дії вахти, команди, підтвердження	Колективний контур підтримки рішень

Наведена структура операційних каналів уваги була використана для того, щоб пов’язати функціональний стан оператора з конкретними інформаційними і керувальними взаємодіями на ходовому містку. Це дало змогу розглядати увагу як обмежений функціональний ресурс, який розподілявся між джерелами навігаційної інформації, каналами комунікації, засобами контролю та органами керування [256, 258, 270, 280, 307].

У межах експериментального блоку було використано просторову ідентифікацію напрямку погляду оператора. З метою точнішої ідентифікації координат очей використовувалися камери спостереження, за допомогою яких визначали положення зіниць у просторі на основі інфрачервоного спектра випромінювання (рис. 6.17). Враховуючи затримку погляду на приладах і при візуальному огляді під час аналізу навігаційної ситуації в середньому 2–7 с., можна зробити висновок, що цього цілком достатньо для спрацювання системи ідентифікації координат зіниці і визначення напрямку погляду.

Відповідно до запропонованої методології, порядок можна представити у вигляді алгоритму, що містить три основні елементи: A_i^{l-d}, $l = 1,...,3$ – ідентифікатор одного з трьох видів сигналів ІСНЗ; d – вид навігаційного приладу або огляду (s – прямо, r –праворуч, l –ліворуч); P_i – ідентифікатор спрацювання концентрації уваги на i-м сигналі ІСНЗ, такий що $p_i = \{0;1\}$; Ω_i – закінчення порядку. Абстрактне поняття елемента в порядку позначимо як O_i.



Рисунок 6.17. Просторова ідентифікація напрямку погляду оператора.

Перехід до нового елемента залежно від найбільш виражених моделей поведінки оператора позначимо: $\xrightarrow{r}$ при $p_i = 1$ і $\xrightarrow[r]{}$ якщо $p_i = 0$. Напрям переходу визначався результатом ідентифікації концентрації уваги позитивний результат дає змогу розвинути порядок у напрямку, відмінному від негативного, та навпаки. Так, наприклад, позитивна ідентифікація сигналів від радара дає змогу синхронізувати їх з параметрами AIS, що дає змогу точніше визначити навігаційну ситуацію. Водночас негативний результат спонукатиме оператора до візуального спостереження, що за умов обмеженої видимості може створювати додатковий ризик помилкової ситуаційної оцінки.

Було досліджено ситуацію, коли оператор визначив подальший порядок:

$$A_1^{2-s}P_2 \xrightarrow{7} A_3^{2-r}P_4 \xrightarrow[5]{} A_5^{2-l}P_6 \xrightarrow{1} A_7^{1-1}P_8 \xrightarrow{11} A_9^{1-3}P_{10} \xrightarrow{7} A_{11}^{1-2}\Omega_{12} \qquad (6.20)$$

Спочатку порядок дій оператора визначався візуальним спостереженням прямо за курсом судна – A_1^{2-s}; потім, у випадку позитивної ідентифікації $P_2 \xrightarrow{7}$ – відбувався перехід на сьомий елемент, характеризований аналізом навігаційного приладу (радара) A_7^{1-1}; якщо результат в був негативний, то задавалися два додаткові елементи A_3^{2-r} – спостереження праворуч та A_5^{2-l} – спостереження ліворуч; аналогічно, якщо в A_7^{1-1} результат був негативним, то додатково оператор звертався до A_9^{1-3} (GPS) і лише у випадку позитивно-го результату відразу переходив до A_{11}^{1-2} (ECDIS).

Аналізуючи цей порядок, можна зробити висновок, що на результат у кожному елементі впливали різні фактори та моделі поведінки. Зокрема, неуважність у діях і погана видимість формували послідовність A_1^{2-s} A_3^{2-r} A_5^{2-l}, тоді як недостатній рівень досвіду формував послідовність A_7^{1-1} A_9^{1-3} A_{11}^{1-2}.

Отже, зі збільшенням кількості елементів у порядку дій зростала кількість ініційованих переходів інформаційної інтерактивної системи; в окремих випадках замкнуті цикли S_i призводили до втрати часу на виконання маневру і за критичного перевищення допустимої часової затримки могли спричинити аварійну ситуацію. Водночас надмірно швидке перемикання уваги на елементи ІСНЗ створювало розриви в порядках, формуючи нові, скорочені за кількістю елементів і, як наслідок, менш безпечні.

Запропоновані підходи для візуальної інтерпретації було подано у вигляді геометричних структур для класифікації моделей аналізу навігаційної ситуації під час виконання складних маневрів. З цією метою було розроблено програмне забезпечення для побудови моделей аналізу навігаційної ситуації (рис. 6.18).

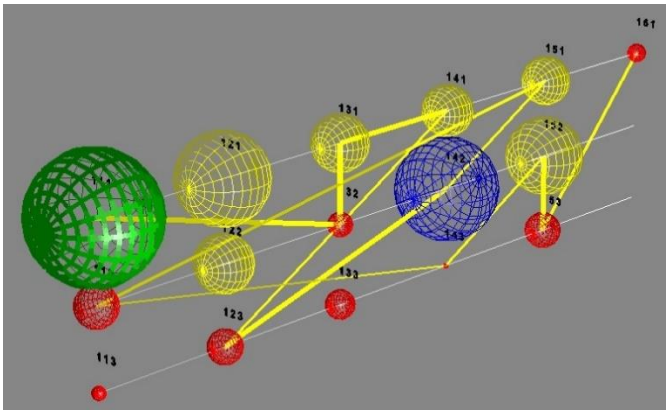


Рисунок 6.18. Геометрична візуалізація визначення зон уваги оператора під час експерименту

Геометрична структура представлена трьома векторами відповідно до груп джерел інформації та кількості джерел. Затримка погляду на вузлі – джерела інформації – формувала сферу залежно від часу в секундах. Швидкість переходу між вузлами визначала параметри ребра геометричної структури, при цьому товщина зв'язку залежить від часу переходу – чим довше перехід, тим товще зв'язок.

Отримані результати дали змогу вважати, що просторово-часова структура уваги оператора є кількісно вимірюваною характеристикою, безпосередньо пов’язаною з безпекою виконання складних маневрів і придатною для використання в інструментальному комплексі діагностики людського фактора в ергатичній системі навігаційного забезпечення.

Такий підхід дав змогу деталізувати розподіл уваги між ECDIS, RADAR/ARPA, візуальним спостереженням, органами керування та іншими функціональними зонами. Отримані дані використовувалися як допоміжний просторово-часовий шар для зіставлення з траєкторними та часовими параметрами.

Другим рівнем діагностики був аналіз когнітивно-часових ознак: часових затримок, змін темпу реакцій, повторних звернень до ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, VHF або органів керування, а також порушення типової послідовності дій. У межах експериментальної перевірки такі ознаки були використані як індикатори зміни темпу операторського циклу.

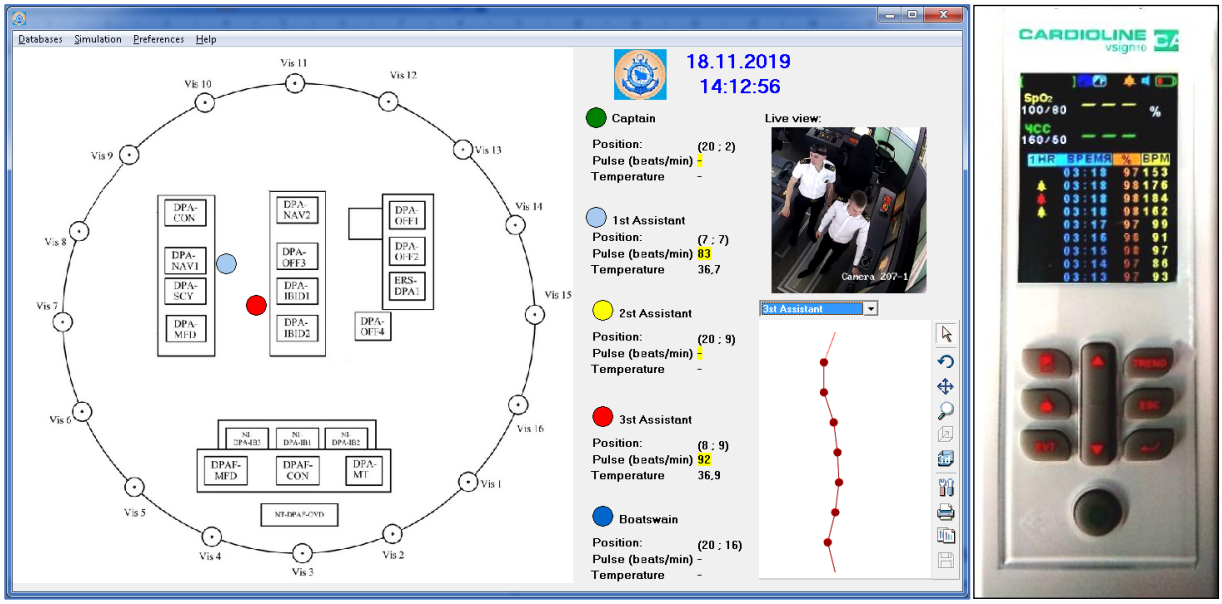


Рисунок 6.19. Інформаційна система моніторингу функціонального стану оператора

На рисунку 6.19 подано інформаційну систему моніторингу функціонального стану оператора. Її експериментальна роль полягала в узгодженні різнорідних джерел: траєкторії руху, часових параметрів дій, операторських звернень до інформаційних каналів, фізіологічних маркерів і контексту навігаційної ситуації. Така структура забезпечила перехід до комплексного профілю операторського стану.

Окремим експериментальним фрагментом було виявлення інтервалів імовірної дисторсії суб'єктивного часу. У межах цієї постановки часово-поведінкові та траєкторні ознаки були використані для виявлення фрагментів, які відхилялися від типового сценарію проходження. Відмінності за параметрами руху судна, часовими інтервалами виконання дій і змінами профілю маневрування дали змогу виокремити ділянки, де могла проявлятися часова дезорганізація операторського циклу.

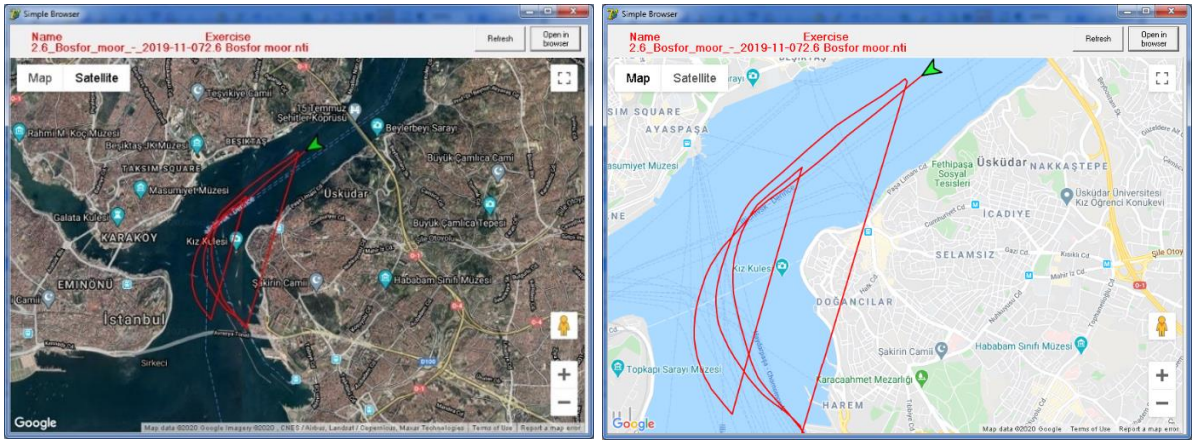


Рисунок 6.20. Траєкторія руху судна з ідентифікацією інтервалів імовірної дисторсії суб'єктивного часу

На рисунку 6.20 наведені експериментальні траєкторії руху суден із синхронізацією з часовою організацією дій оператора. Показано, що ознаки ймовірної дисторсії суб'єктивного часу можуть бути пов'язані зі зміною темпу планування маневру, затримками реакції та підвищенням ризику помилкового вибору дії. Як атомарні елементи для побудови моделі реакцій оператора було прийнято часові діапазони переходів між просторами. Протягом 8 місяців було зібрано дані про виконання типових маневрів у різних районах плавання для 76 операторів за допомогою сертифікованого навігаційного симулятора NTPRO 5000.



Рисунок 6.21. Аналіз критичних ситуацій засобами NTPRO 5000

Зібрані на сервері ECDIS дані дали змогу сегментувати траєкторії та сформувати індивідуальні послідовності переходів для кожного оператора.

Таким чином, були сформовані індивідуальні моделі реакцій на три типові маневрові ситуації: поворот судна на 90º, швартування та постановка судна на якір. Враховуючи складність виконання постановки судна на якір у стиснених водах за високої інтенсивності руху в районі порту Сінгапуру, дослідження було зосереджено саме на цьому маневрі.

Автоматизований аналіз журналів виконання маневрів дав змогу виокремити мікросценарії, утворені взаємопов'язаними параметрами руху судна, що дозволило ідентифікувати конкретну дію відповідного оператора (рис. 6.22).

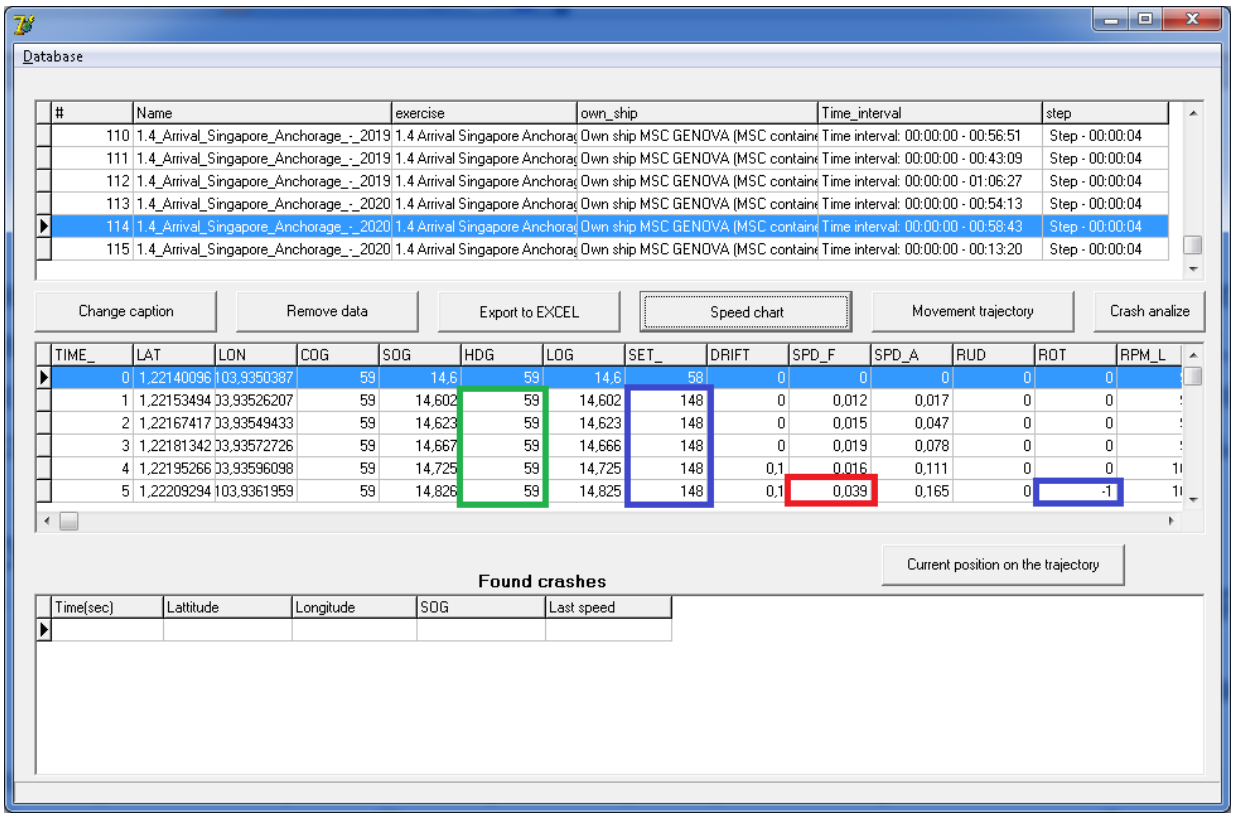


Рисунок 6.22. Мікрофрейм навігаційної ситуації, ідентифікований як окремий маневр



Рисунок 6.23. Аналіз операцій відносно $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$, $Z_{(p=4)}$ і часу виконання

Було встановлено, що виконанню однакових дій можуть передувати різні за своєю природою способи сприйняття ситуації на конкретному етапі. Як показав аналіз експериментальних даних, на початку виконання маневру оператори використовували елементи сприйняття, спираючись на власний досвід. При цьому було відзначено, що швидкість виконання оцінки ситуації залежить від природи сприйняття. Отже, виникає необхідність у побудові схеми індивідуального сприйняття навігаційної ситуації, що відповідає часовому діапазону і положенню на дереві графа. Під типом сприйняття навігаційної ситуації будемо розуміти множину атомарних дій під час проведення експерименту з використанням навігаційного симулятора TRANSAS NTPRO 5000 (рис. 6.23, група операторів №18). Як показав експеримент, у типових (стандартних) ситуаціях час може бути спотворений залежно від складності локацій, але сам алгоритм реакцій практично не змінюється. Під час непередбачуваних дій оператора, модуль автоматизованої ідентифікації критичних ситуацій (МАІКС) виявив у 4 ситуаціях формування непрогнозованої гілки реакцій-дій. Як показав експеримент, цьому явищу передувала тривала пауза, що перевищувала поріг у 3–5 разів.

Отримані експериментальні дані надали можливість виявлення точок на графі у вигляді початку критичних ситуацій, які вказували на етап переходу між просторами сприйняття навігаційних ситуацій за часовими ознаками дій.

Під час експерименту необхідно було відрізнити часовий інтервал, пов'язаний з переходом до нового простору сприйняття, від часового інтервалу, що вказує на зміну стратегії реакцій, так званий «злам траєкторії прийняття рішення», що характеризується різкою зміною плану дій. З цією метою були зібрані дані для аналізу за допомогою автоматизованих нейронних мереж у вигляді часових рядів *p*-адичної структури (табл. 6.8).

Таблиця 6.8. Експериментальні дані виконання операції

Ідентифікатор	Вибірка часових показників виконання операцій навігаційними вахтами, с									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1.1. X, $\Delta t_{(9)1001}$	0,8	1,0	0,9	0,7	0,8	1,2	1,1	0,8	0,7	0,9

Продовження таблиці 6.8.

1.2. *X*, $\Delta t_{(7)111}$	5,4	5,8	5,7	5,4	5,5	6,7	6,2	5,6	5,5	6,1
1.3. *X*, $\Delta t_{(10)1010}$	9,6	11,4	10,5	9,6	9,3	12,3	10,3	9,9	9,4	9,8
1.4. *Y*, $\Delta t_{(24)220}$	17,2	18,3	17,5	17,0	17,3	18,4	18,5	17,5	16,9	17,0
1.5. *Z*, $\Delta t_{(61)331}$	81,9	83,2	84,0	80,6	81,1	85,6	87,5	82,9	81,3	89,3
2.1. *Y*, $\Delta t_{(16)221}$	171,2	184,3	170,2	163,4	170,4	191,2	182,3	173,2	169,2	174,4
2.2. *Y*, $\Delta t_{(5)12}$	41,5	45,2	42,8	39,7	41,1	48,4	47,3	42,3	40,6	44,3
2.3. *X*, $\Delta t_{(4)10}$	12,3	13,1	12,4	12,0	12,4	15,2	13,9	12,2	11,9	12,0
2.4. *Z*, $\Delta t_{(43)223}$	93,2	96,3	94,9	89,2	91,4	101,5	98,2	94,3	91,3	96,8
2.5. *Y*, $\Delta t_{(14)112}$	20,7	22,6	21,5	19,3	21,0	24,2	23,6	21,1	19,2	20,9
2.6. *Y*, $\Delta t_{(17)122}$	31,3	33,0	32,4	29,3	30,2	33,2	32,7	31,3	29,8	32,1
2.7. *Z*, $\Delta t_{(51)303}$	64,7	67,2	66,9	63,3	64,7	69,7	70,4	65,3	65,4	67,3
3.1. *Z*, $\Delta t_{(34)202}$	86,7	90,3	89,0	83,3	85,4	93,1	94,7	88,2	81,3	86,9
3.2. *Y*, $\Delta t_{(11)102}$	45,2	44,7	48,2	43,6	44,8	50,1	49,2	46,2	42,1	47,2
3.3. *Y*, $\Delta t_{(18)200}$	32,4	34,2	33,9	31,2	32,7	38,2	38,5	32,1	30,8	32,6
3.4. *Z*, $\Delta t_{(44)230}$	52,0	55,3	54,7	50,0	51,5	59,3	61,3	52,3	52,1	54,7
3.5. *Z*, $\Delta t_{(55)313}$	27,1	30,1	29,3	26,8	27,4	32,1	31,4	28,3	26,1	28,9
3.6. *Z*, $\Delta t_{(14)32}$	19,6	21,2	20,5	18,3	19,5	23,1	21,4	18,3	16,3	19,9
4.1. *X*, $\Delta t_{(28)1100}$	4,9	5,3	5,2	4,6	4,5	6,1	5,9	5,1	3,9	4,3
4.2. *Y*, $\Delta t_{(12)110}$	13,9	15,6	14,5	12,4	13,6	15,2	16,0	13,7	11,0	13,8
4.3. *Z*, $\Delta t_{(60)330}$	347,2	367,4	349,2	338,7	327,5	361,9	352,2	344,8	341,2	354,2
4.4. *Z*, $\Delta t_{(53)311}$	211,3	219,4	216,3	209,1	207,6	227,9	218,2	210,7	207,1	213,0
4.5. *Y*, $\Delta t_{(13)111}$	35,4	37,1	38,4	31,3	34,5	39,1	37,2	35,7	33,2	36,1
4.6. *Z*, $\Delta t_{(58)322}$	130,9	135,2	130,4	127,2	130,8	141,3	133,9	128,5	129,3	134,2
5.1. *Y*, $\Delta t_{(19)201}$	33,5	36,2	34,1	30,2	33,3	27,3	35,7	32,8	29,9	30,6
5.2. *Z*, $\Delta t_{(38)212}$	747,2	782,1	756,2	724,1	743,1	812,4	801,3	729,4	673,3	748,0
5.3. *X*, $\Delta t_{(15)1111}$	9,4	10,3	9,7	8,9	9,2	11,7	10,5	9,7	9,1	10,1
5.4. *Y*, $\Delta t_{(23)212}$	125,4	131,8	127,8	120,2	126,3	134,9	132,5	125,0	118,9	127,3

Перед побудовою прогностичної моделі було виконано формальну перевірку часової структури ряду. Для цього було застосовано автокореляційну функцію, часткову автокореляційну функцію, періодограму та тест Льюнга-Бокса для перевірки залишкової автокореляції. Автокореляцію для лагу *k* було визначено як:

$$\rho(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^{n}(x_t - \bar{x})(x_{t-k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2} \ . \qquad (6.21)$$

Для перевірки сукупної автокореляції до лагу *h* використовувалась статистика:

$$Q(h) = n(n+2)\sum_{k=1}^{h}\frac{\rho^2(k)}{n-k} . \qquad (6.22)$$

Наявність повторюваної структури вважалася підтвердженою лише за умови узгодженості результатів візуального аналізу, автокореляційних характеристик і перевірки залишків моделі.

Для аналізу динаміки цього ряду було побудовано лінійний графік для десяти випробувань *A*–*J* (рис. 6.24).

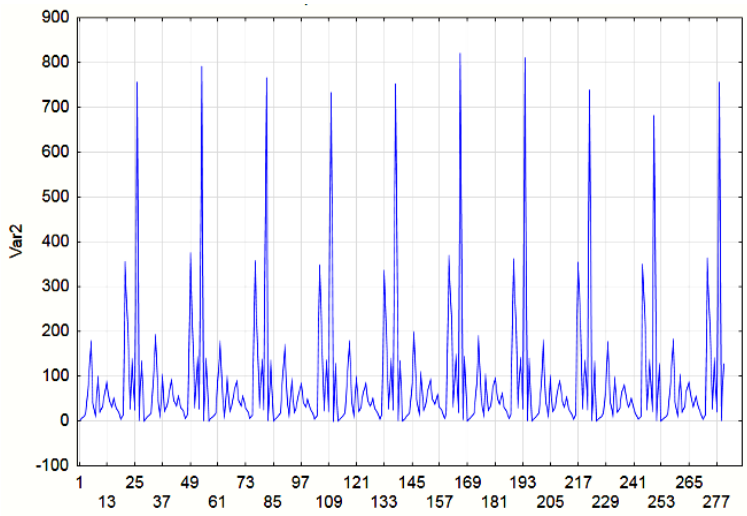


Рисунок 6.24. Графік періодичності часового ряду за експериментальними даними

При цьому не було виявлено тенденції до зростання або згасання екстремумів графіка, що свідчить про сформовану модель реакцій щодо виконання операції постановки судна на якір. Незначні коливання свідчать про те, що в різних морських портах навігаційна ситуація закономірно відрізняється, але при цьому істотно не змінює структуру реакцій оператора. Період повторення становив 28 вимірювань, що відповідало повній послідовності досліджуваних дій. Кожна дія має свій часовий показник виконання. Отримані експериментальні дані дали змогу перейти до побудови нейромережевої регресійної моделі для виконання автоматизованого прогнозу часового ряду на подальший період. Під час навчання було автоматично отримано 7 найбільш вдалих моделей (рис. 6.25). За результатами аналізу було обрано мережу № 5, яка мала найменше значення помилки. Для неї також було побудовано діаграму залишків (Таблиця 6.9).

Таблиця 6.9. Результати навчання активних нейромережевих моделей

Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Training error	Test error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 28-3-1	0,993016	0,997458	30,18913	72,67654	BFGS 26	SOS	Identity	Identity
2	MLP 28-7-1	0,998481	0,997466	23,07175	74,01402	BFGS 28	SOS	Tanh	Identity
3	MLP 28-6-1	0,993289	0,997463	26,00794	73,60702	BFGS 24	SOS	Tanh	Identity
4	MLP 28-8-1	0,993239	0,997468	26,78629	72,81711	BFGS 35	SOS	Tanh	Identity
5	MLP 28-7-1	0,993928	0,997598	16,30374	68,20398	BFGS 49	SOS	Tanh	Identity
6	MLP 28-6-1	0,993339	0,997480	25,24820	72,97567	BFGS 33	SOS	Tanh	Identity
7	MLP 28-8-1	0,998701	0,997548	19,82749	71,12372	BFGS 42	SOS	Tanh	Identity

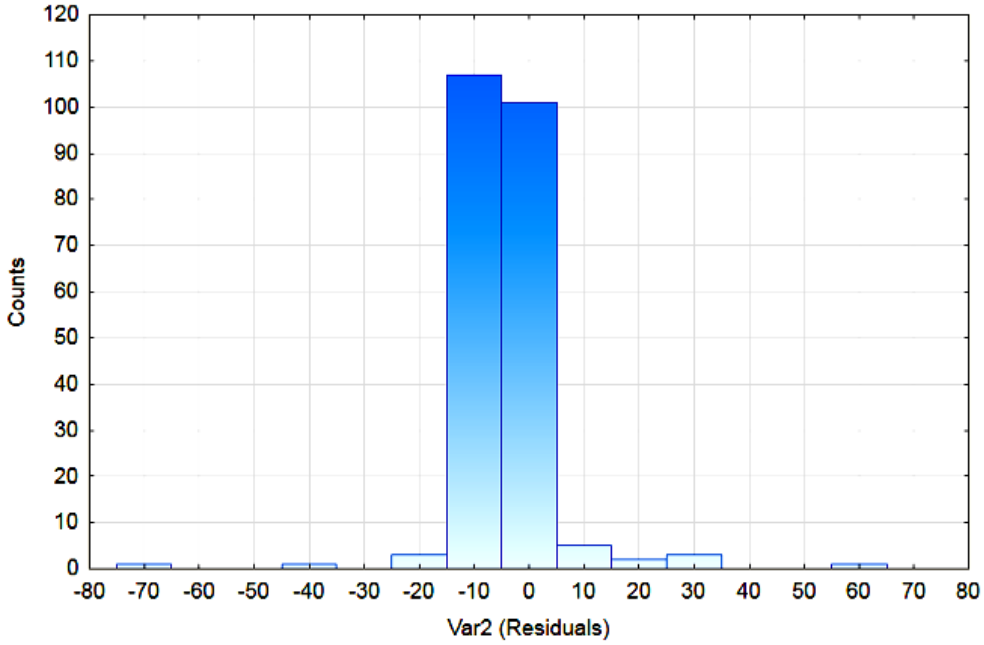


Рисунок 6.25. Діаграма залишків найкращої мережі

Вибір нейромережевої моделі здійснювався не лише за мінімальною помилкою у навчальній вибірці, а за результатами розділення даних на навчальну та тестову частини. Розділення за частинами виконувалося за часовими блоками, де майбутні цикли не включалися до навчального набору. Якість прогнозу оцінювалась за показниками:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(y_t - \hat{y}_t\right)^2}, \tag{6.23}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|y_t - \hat{y}_t\right|, \tag{6.24}$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t}\right|, \tag{6.25}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} \left(y_t - \hat{y}_t \right)^2}{\sum_{t=1}^{n} \left(y_t - \bar{y}_t \right)^2}. \qquad (6.26)$$

Для перевірки практичної доцільності нейромережевий прогноз було порівняно з базовими моделями: naive, seasonal naive, ARIMA/ ETS. Такий підхід дав змогу відокремити реальну прогностичну здатність моделі від простого відтворення повторюваного шаблону часового ряду. Гістограма залишків демонструє концентрацію основної маси значень поблизу нуля, однак містить окремі відхилення. Тому адекватність нейромережевої моделі оцінювалася за сукупністю показників RMSE, MAE, MAPE, R^2 та результатами перевірки на тестовій вибірці. Було також оцінено якість роботи моделі шляхом побудови діаграми розсіювання цільових і вихідних змінних (рис. 6.26).

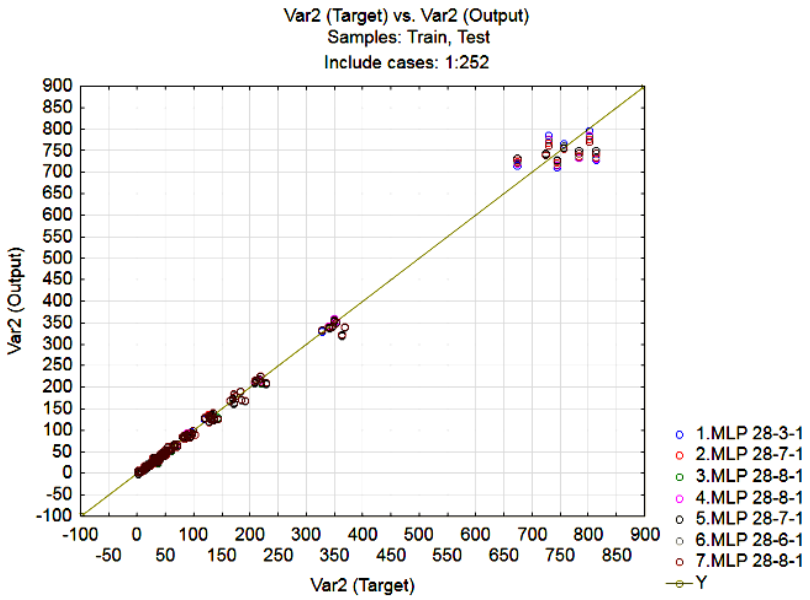


Рисунок 6.26. Діаграма розсіювання цільових і вихідних змінних

На діаграмі видно, що найбільш впорядковані відносно діагоналі точки моделі №5, що також підтверджує доцільність її вибору з огляду на високу якість побудованої нейронної мережі. Перевірено, наскільки обрана модель виконує прогнозування вихідного ряду [356, 202]. Побудований графік прогнозу з високими значеннями подібності повторює вихідні дані (рис. 6.27).

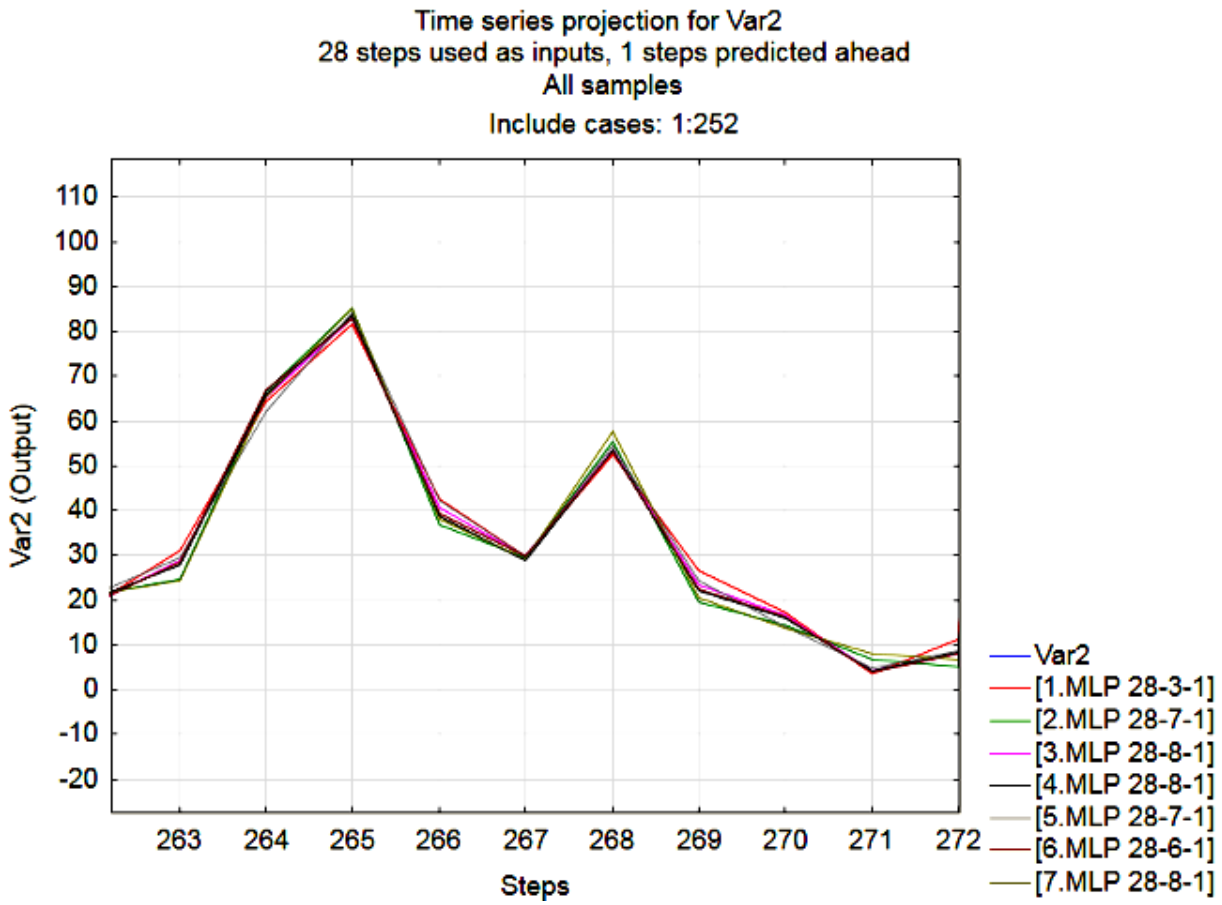


Рисунок 6.27. Фрагмент графіка отриманого прогнозу

Це вказує на здатність моделі відтворювати обмежені часові патерни реакцій у межах типових сценаріїв, близьких до навчальної вибірки. Тому результати прогнозування слід інтерпретувати як інструмент раннього виявлення відхилень від індивідуально стабільного шаблону дій оператора.

Також було побудовано прогнозну проєкцію для візуального аналізу результатів нейромережевої моделі. Кількісне оцінювання точності здійснювалося за показниками (6.23)–(6.26). На рисунку 6.28 наведено прогноз на чотири цикли. З огляду на зростання похибки зі збільшенням горизонту прогнозування, практичне використання моделі обмежено двома циклами з подальшим оновленням вхідних даних. На основі вказаного підходу було визначено механізм перетворення даних сервера ECDIS, емпірично отриманого відеоряду часових показників, що дозволило ідентифікувати індивідуальну карту сприйняття навігаційних ситуацій операторів на графі p-адичних просторів.

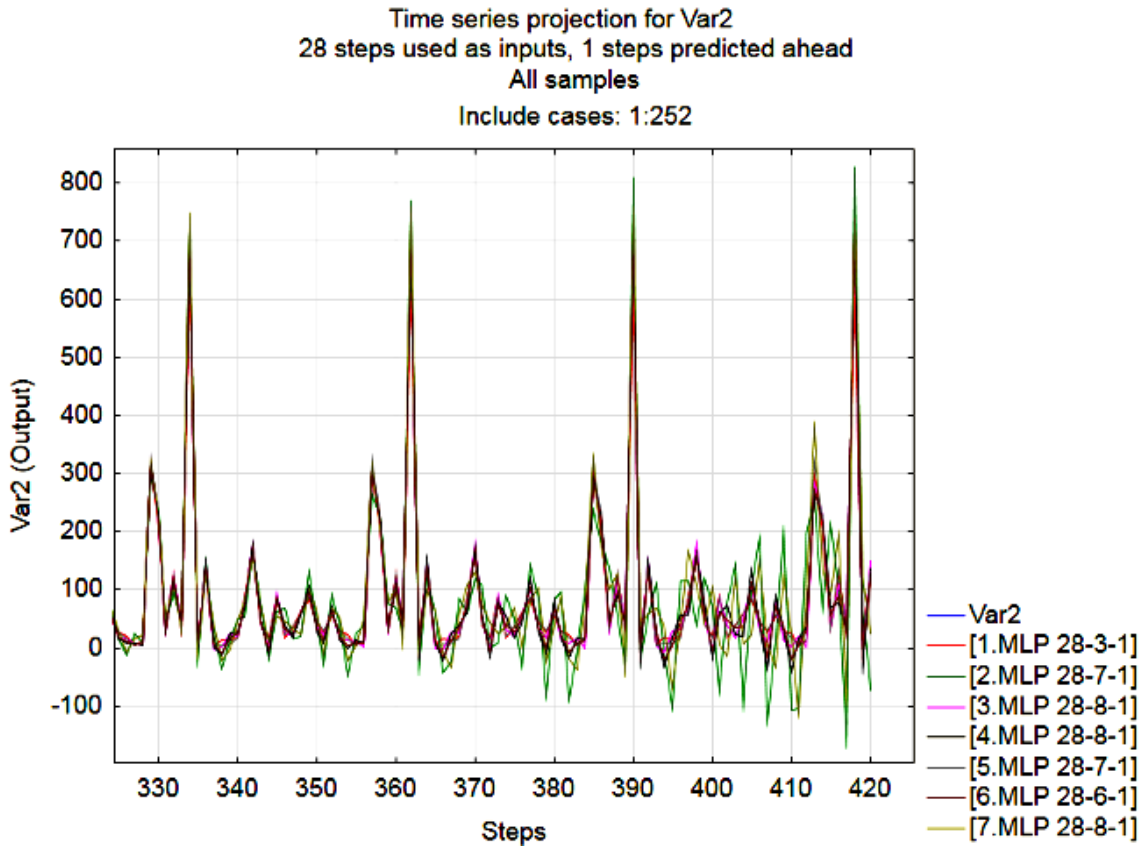


Рисунок 6.28. Прогноз на чотири цикли

Моделювання дало змогу за допомогою МАІКС ідентифікувати точки переходів між просторами сприйняття, що вказує на зміну часу реакцій операторів у ході людино-машинної взаємодії.

Після експериментальної перевірки траєкторних, експертних і функціонально-операторських ознак було виконано наступний етап верифікації – інтеграцію отриманих результатів у контур підтримки прийняття рішень, МАІКС та сценарно-імітаційну перевірку інтегрального показника ризику ІСНЗ. Першим етапом інтеграції стало прогнозування критичної ситуації на основі CART-моделі. Як залежну змінну використано критерій Fr5 «Результативність виконання завдання оператором», а вхідний простір сформовано на основі факторів Fs1–Fs9 та Fr1–Fr4, які відображали навігаційні, операторські, часові, ситуаційні та керувальні характеристики. Модель була використана не як причинний доказ впливу окремого фактора, а як інструмент прогнозування, що встановив умовні зв’язки між сукупністю ознак і результативністю виконання операцій.

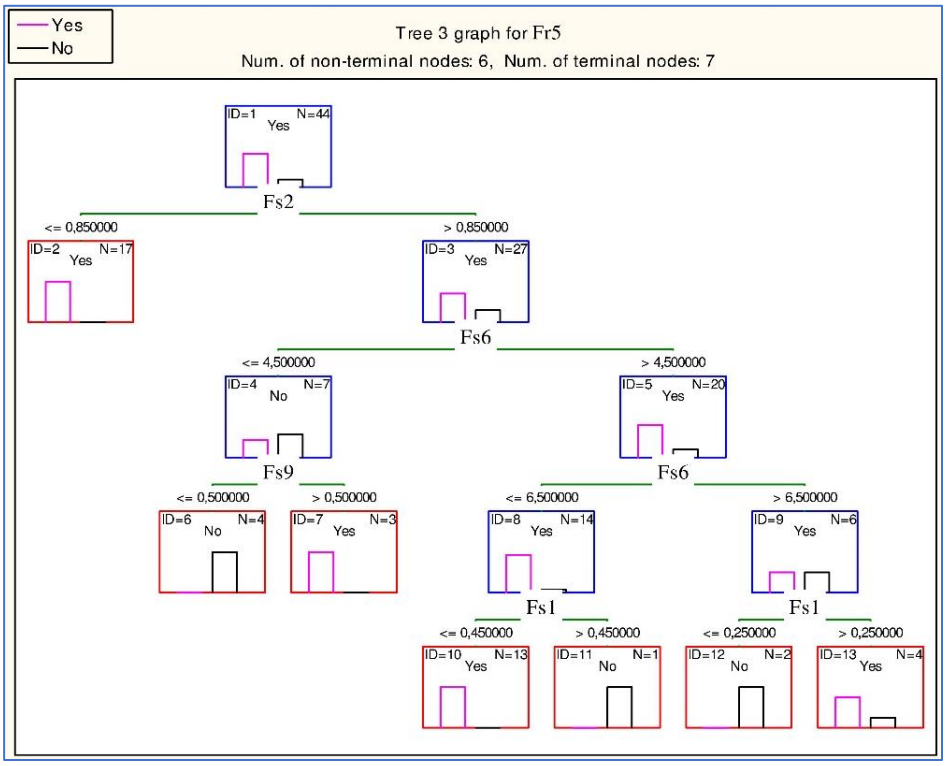


Рисунок 6.29. Дерево прогнозування критичної ситуації за впливу людського фактора на ергатичну систему управління судном

Як видно з рисунка 6.29, критична ситуація була подана не як одинична подія, а як послідовність переходів між станами, які залежали від рівня розпізнавання ситуації, складності дій, синхронізації з командою, повноти інформаційної оцінки та результативності виконання завдання.

Таблиця 6.10. Узагальнені правила переходів у дереві прогнозування критичної ситуації

Блок переходу	**Ознака або фактор**	**Інтерпретаційне значення**	**Реакція системи**
Розпізнавання ситуації	Fs1	Відповідність поточного положення судна очікуваному сценарію	Уточнення ситуаційної моделі
Деталізація інформаційного простору	Fs2	Повнота зіставлення ситуації з попередніми сценаріями	Перевірка достатності інформації
Складність взаємодії з навігаційними засобами	Fs6	Зростання кількості інформаційних переходів між ECDIS, ARPA, AIS, GPS	Підвищення рівня контролю

Продовження таблиці 6.10.

Командна синхронізація	Fs9	Узгодженість дій оператора з навігаційною вахтою	Посилення командної взаємодії
Результативність виконання завдання	Fr5	Зниження якості або своєчасності реалізації дії	Формування попередження або рекомендації
Критичний перехід	Сукупність Fs–Fr	Накопичення ознак невизначеності, затримки або втрати стійкості дій	Активація ІСНЗ або МАІКС

Узагальнені правила переходів, наведені в таблиці 6.10, дали змогу подати прогнозну модель у формі, придатній для інтерпретації. Було зафіксовано, що критичний стан формувався не за одним ізольованим параметром, а внаслідок накопичення ознак інформаційної невизначеності, підвищеної складності дій, часової затримки, недостатньої синхронізації з командою та зниження результативності виконання навігаційного завдання.

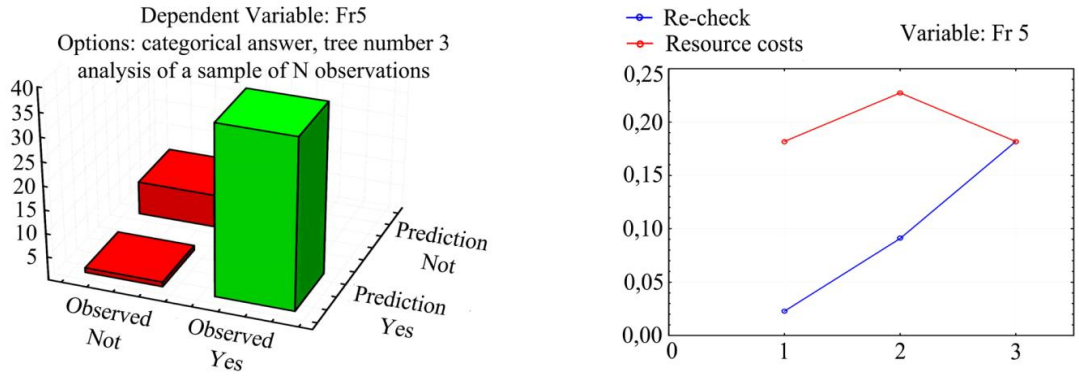


Рисунок 6.30. Аналіз прогностичної моделі критичної ситуації: *а* – ступінь достовірності прогнозу; *б* – витрати на побудову дерева

На рисунку 6.30 було подано результати аналізу моделі прогнозу за двома параметрами: ступенем достовірності прогнозу та витратами часу на побудову гілок дерева. Це дало змогу оцінити не лише структуру дерева прогнозу, а й його практичну придатність для використання в умовах обмеженого часу. Модель була достатньо інтерпретованою для включення в контур ІСНЗ, оскільки її вузли відповідали зрозумілим навігаційним, операторським і ситуаційним факторам.

Після побудови прогнозного дерева було виконано перевірку переходу

від прогнозної оцінки до керувальної реакції [186, 217, 219, 221, 230, 357].. У разі досягнення критичних порогів система ініціювала один із рівнів реагування: інформаційне попередження оператора, посилення контролю навігаційної вахти, залучення капітана або старшого помічника, а також формування рекомендації щодо коригувального втручання в межах прийнятого сценарію безпеки. Така логіка дала змогу пов’язати діагностичні й прогнозні ознаки з конкретними діями в контурі ІСНЗ.

6.5. Експериментальна ідентифікація непрямих ознак функціонального стану оператора

Багатоканальна верифікація уточнює оцінку функціонального стану оператора шляхом поєднання траєкторних, часових, поведінкових, фізіологічних, термографічних і контекстних ознак. Цей блок не є медичною діагностикою, а виконує функцію операційного оцінювання стану оператора в контурі ІСНЗ.

Вектор первинних спостережень має вигляд:

$$X_{HF}(t)=\left[X_{traj}(t),X_{time}(t),X_{beh}(t),X_{phys}(t),X_{therm}(t),X_{ctx}(t)\right]. \tag{6.27}$$

Після нормування формується вектор ознак:

$$\begin{gathered} Z_{(HF)}(t)=[B_{(traj)}(t),B_{(time)}(t),B_{(beh)}(t),B_{(phys)}(t),B_{(therm)}(t)], \\ C_{(ctx)}(t)=\mathcal{N}_{(ctx)}(X_{(ctx)}(t)) \end{gathered}. \tag{6.28}$$

де $\mathcal{N}_{(ctx)}(\cdot)$ – оператор нормування контекстних ознак.

Оцінка стану визначається як:

$$\hat{S}_{HF}(t)=\Psi\left(Z_{HF}(t),C_{ctx}(t)\right), \tag{6.29}$$

де $C_{ctx}(t)$ враховує складність району, фазу маневру, режим керування, інтенсивність трафіку, видимість та інші умови, без яких окремі ознаки не можуть бути коректно інтерпретовані.

Для перевірки узгодженості непрямих ознак використовується принцип багатоканального підтвердження:

$$K_{HF}(t)=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}I(B_j(t)\geq\theta_j), \tag{6.30}$$

де $K_{HF}(t)$ – коефіцієнт узгодженості ознак, $I(\cdot)$ – індикаторна функція, θ_j – порогове значення для відповідної групи ознак. Чим більше незалежних груп ознак одночасно перевищують порогові значення в одному контексті, тим вищою є достовірність висновку про зміну функціонального стану.

Формальний перехід цього рівня має вигляд

$$X_{HF}(t) \to Z_{HF}(t) \to K_{HF}(t), C_{ctx}(t) \to \hat{S}_{HF}(t) \to \hat{R}(t+\Delta t). \qquad (6.31)$$

Практичне використання результату полягає у виявленні ділянок маршруту, де ознаки функціонального напруження збігаються з траєкторними відхиленнями, часовими затримками, повторними зверненнями до навігаційних засобів або підвищеною складністю ситуації. Це створює основу для тренажерного розбору, оцінювання режиму вахти та формування попереджувальних дій ІСНЗ.

Основну увагу було зосереджено на фізіологічних, відновлювальних і термографічних маркерах, які можуть уточнювати інтерпретацію траєкторних, часових і поведінкових даних, але не підміняють їх [345]. Такий підхід забезпечив методичну обережність експериментальної оцінки: частота серцевих скорочень, добовий профіль активності, показники сну, пульсові тренди та термографічні зміни формують доказове значення лише за умови синхронізації з режимом вахти, складністю навігаційної ситуації, фазами маневру, відеофіксацією, журналами ECDIS та контекстом операторських дій.

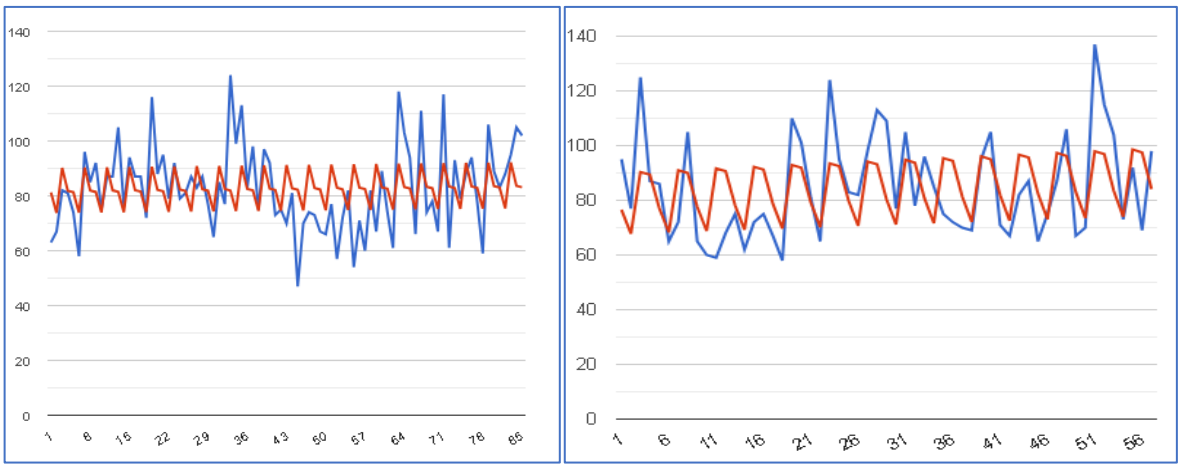


Рисунок 6.31. Тренд зміни частоти серцевих скорочень II помічника капітана під час перебування на судні

Таким чином, ЧСС було застосовано як допоміжний індикатор функціонального напруження. Зміни частоти серцевих скорочень були інтерпретовані лише у зв’язку з фазами навігаційної діяльності, складністю маневру, режимом вахти й контекстом ситуації. Такий підхід унеможливив ізольоване трактування пульсу як прямого доказу стресу або втоми.

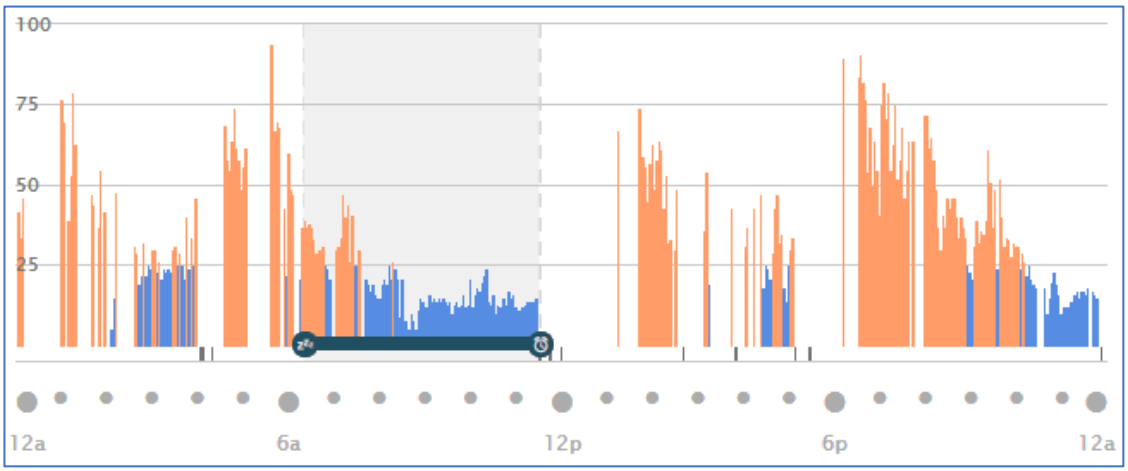


Рисунок 6.32. Добовий розподіл відпочинку, активності та переживання стресу II помічника капітана під час несення вахти

Добовий розподіл відпочинку, активності та стресових епізодів дав змогу оцінити часовий фон функціонування оператора. Його доказове значення полягало в тому, що фізіологічні та відновлювальні ознаки були прив’язані до добового режиму, а не розглядалися як одноразові вимірювання. Це дозволило врахувати можливий вплив сну, активності та тривалості навантаження на подальші операторські реакції (рис. 6.33).

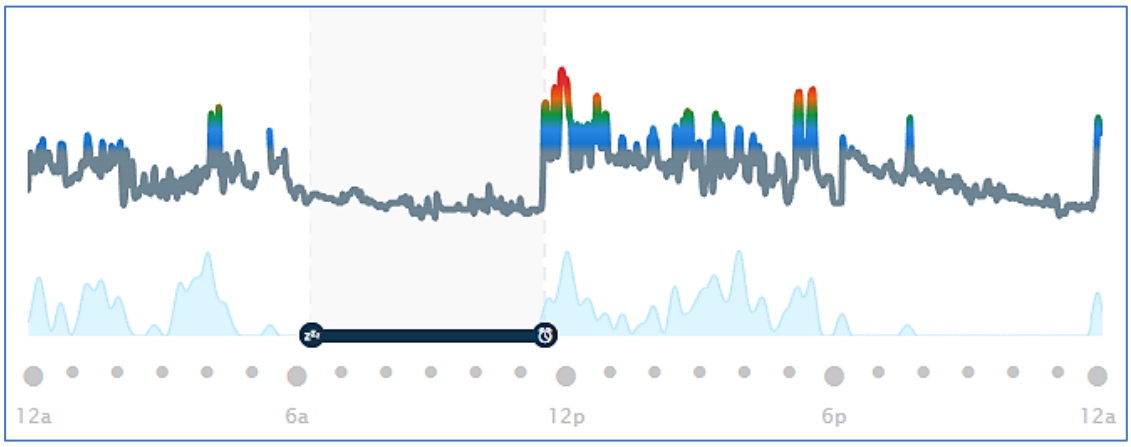


Рисунок 6.33. Комплексний добовий профіль ЧСС, рухової активності та сну II помічника капітана

На рисунку 6.33 об’єднано ЧСС, рухову активність і сон у єдиний добовий профіль. Це підтвердило, що функціональний стан оператора доцільно було аналізувати не за одним ізольованим параметром, а за сукупною часовою динамікою. Такий профіль було використано як допоміжний шар для подальшого зіставлення з вахтовим режимом, складністю маневрів і навігаційним контекстом.

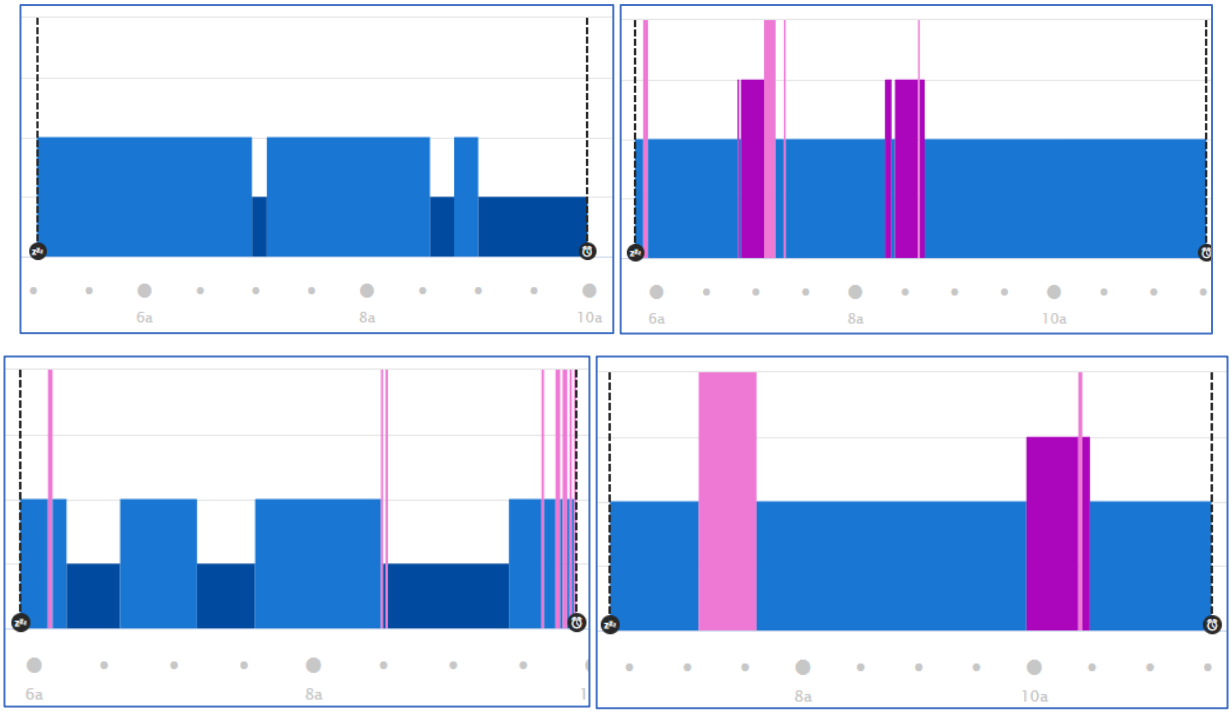


Рисунок 6.34. Добові показники сну II помічника капітана як індикатор відновлення перед несенням вахти

Дані, наведені на рисунку 6.34, було використано для оцінювання відновлювального компонента функціонального стану оператора. Було зафіксовано різну тривалість сну в окремі добові періоди, зокрема 4 год 57 хв, 6 год 04 хв, 5 год 33 хв, 3 год 48 хв і 4 год 40 хв. Ці дані були інтерпретовані як показник потенційної нерівномірності відновлення перед несенням вахти.

Також в експерименті було використано пульсовий тренд нічного фрагмента активності як локальний фізіологічний маркер вахтового навантаження. Було зафіксовано тривалість фрагмента 1 год 00 хв 28 с, середній пульс 78 уд./хв, максимальний пульс 95 уд./хв та енергетичні витрати 151 ккал. Ці значення були використані як додатковий фактор для зіставлення з режимом вахти, активністю та подіями в навігаційному сценарії.

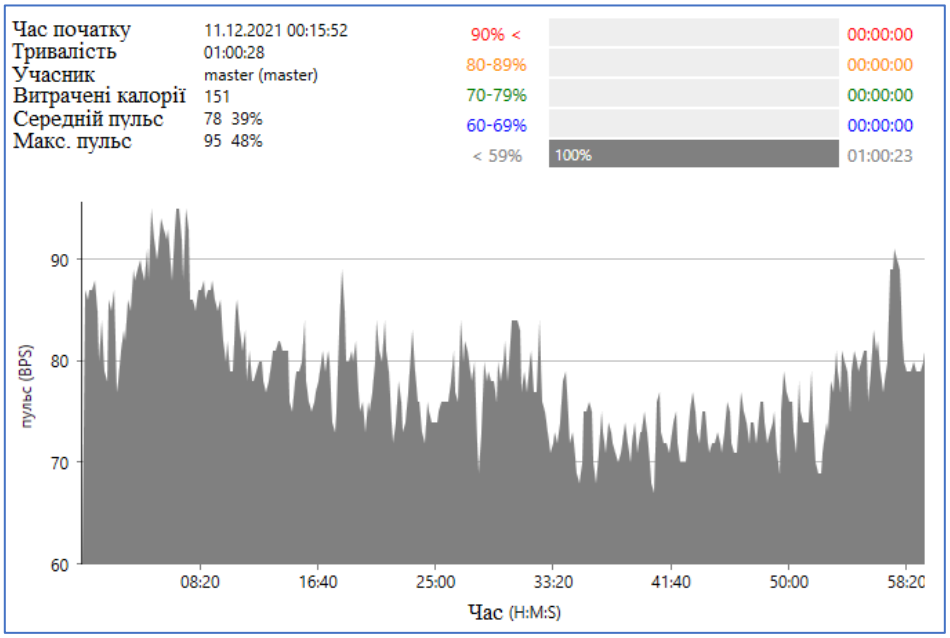


Рисунок 6.35. Пульсовий тренд учасника вахтової діяльності під час нічного фрагмента активності 11.12.2021

Окрему групу експериментальних ознак становили термографічні зміни на ходовому містку в реальній ситуації, що були пов’язані з реакцією оператора на ситуацію зближення, маневром уникнення небезпеки, функціональною мобілізацією, стресовою реакцією та подальшим відновленням. У межах цього експерименту термографічні матеріали були використані як непрямі ознаки, які розширювали діагностичний контур ІСНЗ, що доповнило часовий та експертний аналіз.

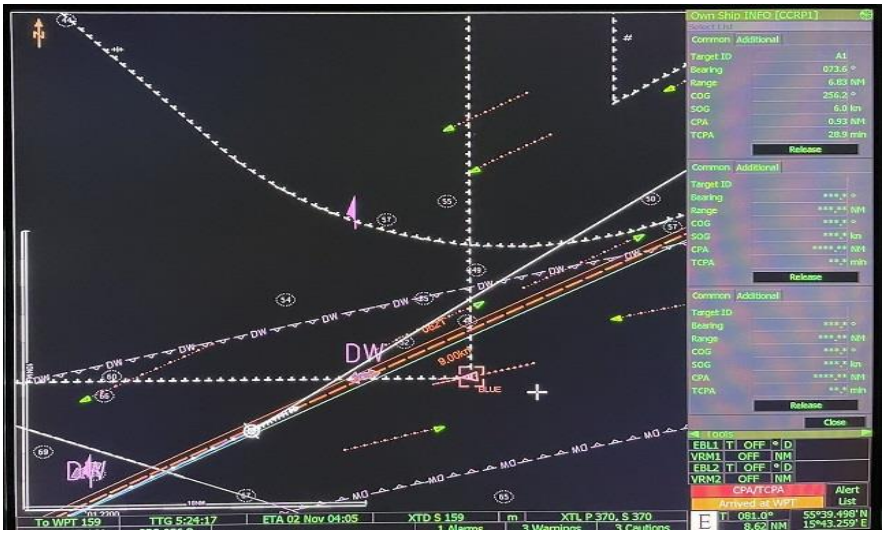


Рисунок 6.36. Сценарій зближення суден у межах аналізу функціонального напруження оператора

На рисунку 6.36 подано навігаційний контекст для інтерпретації термографічних ознак. Ситуація зближення суден була використана як експериментальний сценарій, у якому оператор мав аналізувати параметри ризику, своєчасно приймати рішення щодо маневру і утримувати контроль над інформаційним полем.

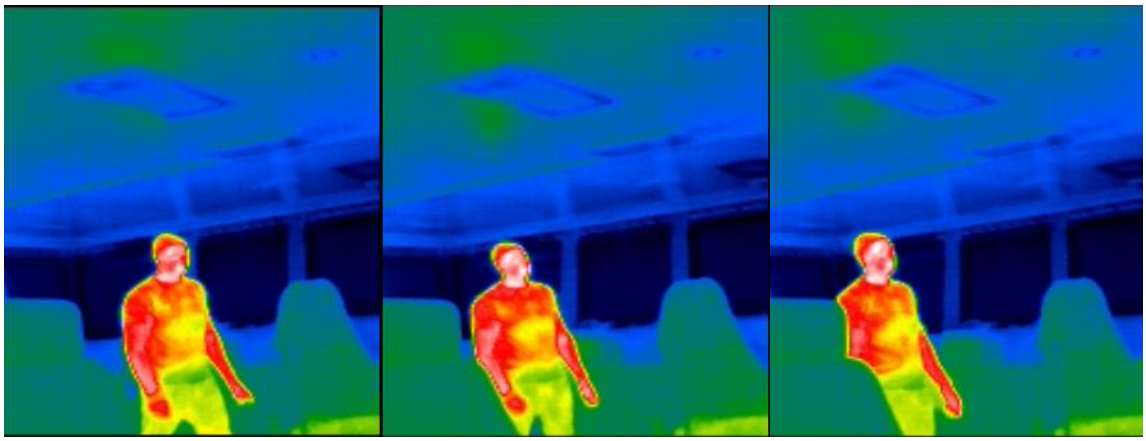
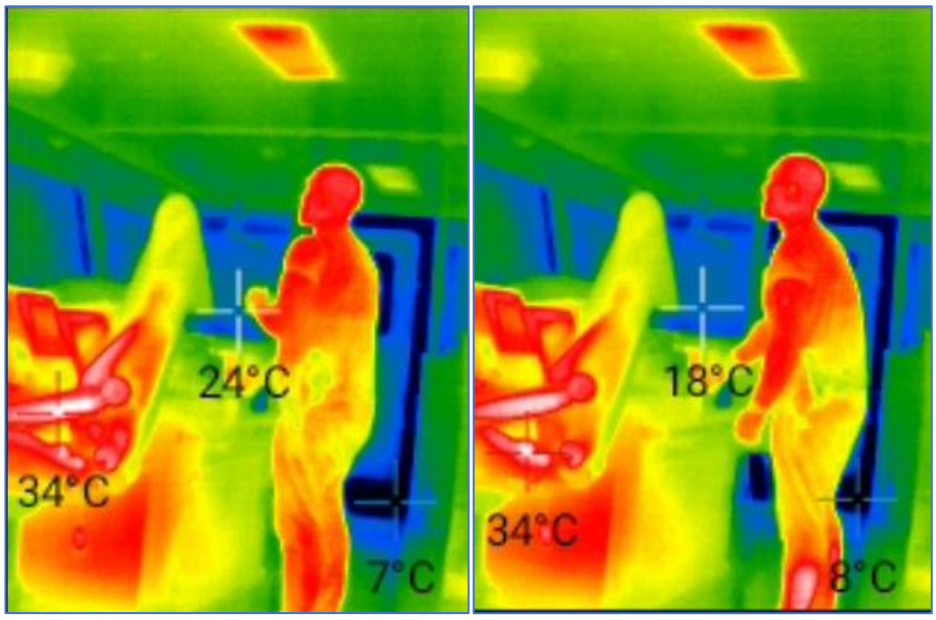


Рисунок 6.37. Термографічні ознаки функціональної мобілізації оператора під час виконання маневру уникнення небезпеки

На рисунку 6.37 було зафіксовано термографічні ознаки, що відповідають моменту функціональної мобілізації оператора під час виконання маневру розходження суден. Їхню інтерпретацію було виконано обережно: термографічні зміни розглядалися як допоміжний індикатор.



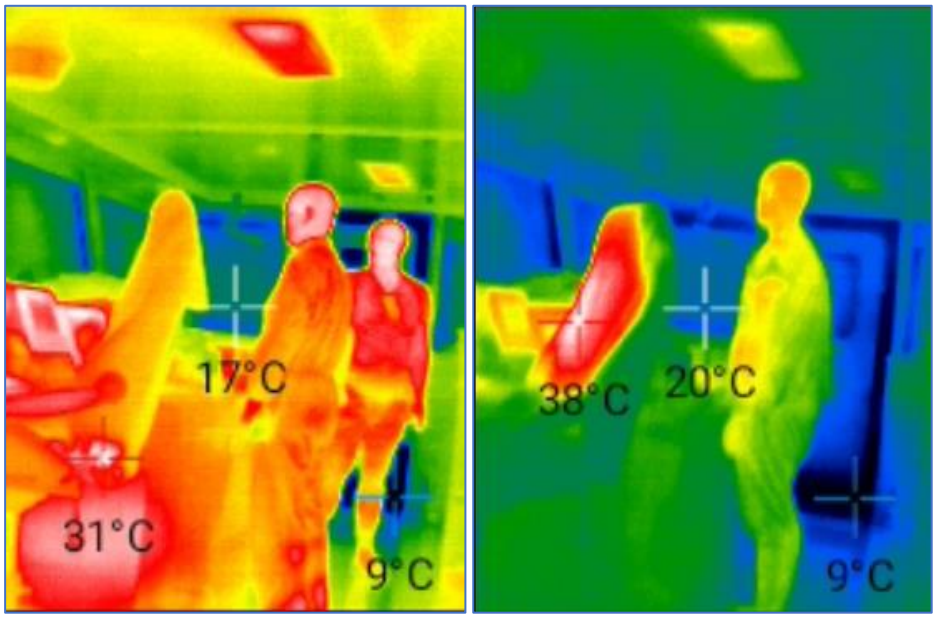


Рисунок 6.38. Термографічні ознаки стресової реакції для подальшого відновлення функціонального стану оператора

Рисунок 6.38 відображає зміну термографічних ознак у контексті стресової реакції та подальшого відновлення. Фізіологічні та термографічні дані підвищили інформативність діагностичного контуру щодо стану оператора та дали змогу уточнити моменти можливого функціонального напруження, мобілізації або відновлення після складного маневру.

Таблиця 6.11. Групи непрямих ознак функціонального стану оператора в контурі ІСНЗ

Група ознак	**Приклади**	**Інтерпретаційне значення**	**Обмеження**
Траєкторні	XTE, курс, швидкість, ROT, кривизна траєкторії	Непряма оцінка стабільності керування	Не доводили психологічний стан без контексту
Часові	Затримка реакції, тривалість маневру, паузи між діями	Ознаки зміни темпу операторського циклу	Потребували порівняння з базовим профілем
Поведінкові	Повторні звернення до ECDIS, RADAR/ARPA, AIS	Ознаки уточнення, невизначеності або перевантаження	Могли бути штатними для складної ситуації
Постуральні	Зміна положення тіла, нахил, зона роботи біля приладів	Допоміжні ознаки функціонального навантаження	Не були самостійним доказом втоми
Фізіологічні	Пульс, температура, ознаки збудження	Допоміжна оцінка напруження або виснаження	Потребували етичного та методичного контролю

Продовження таблиці 6.11.

Термографічні	Локальні температурні зміни, ознаки мобілізації або відновлення	Допоміжне уточнення функціонального профілю	Потребували зіставлення з подіями сценарію
Контекстні	Трафік, видимість, складність району, режим керування	Пояснювали причини зміни поведінки	Без них інтерпретація була неповною

У таблиці 6.11 було підсумовано експериментальну логіку підрозділу 6.5. Було розмежовано групи ознак, їхні приклади, інтерпретаційне значення та обмеження. Траєкторні ознаки фіксували стабільність або нестабільність керування; часові – зміну темпу операторського циклу; поведінкові – структуру взаємодії з навігаційними засобами; фізіологічні й термографічні – допоміжний контекст для оцінювання функціонального напруження.

Наступним етапом експериментального впровадження розроблених моделей і методів управління ІСНЗ було виявлення непрямих ознак функціонального виснаження під час виконання операцій.

Експериментальне дослідження виконання операції швартування було спрямоване на ідентифікацію результативності плану дій оператора за різного рівня функціонального виснаження (табл. 6.12):

Для перевірки непрямих ознак функціонального виснаження було проведено експеримент, в якому взяли участь 74 курсанти, які виконували операцію швартування судна за умов різного функціонального навантаження. Отримані дані дали змогу перевірити, що зміни постави, швидкості мікрореакцій, повторні звернення до елементів траєкторії та часові затримки формували відтворювані непрямі ознаки, пов’язані зі зміною функціонального стану оператора.

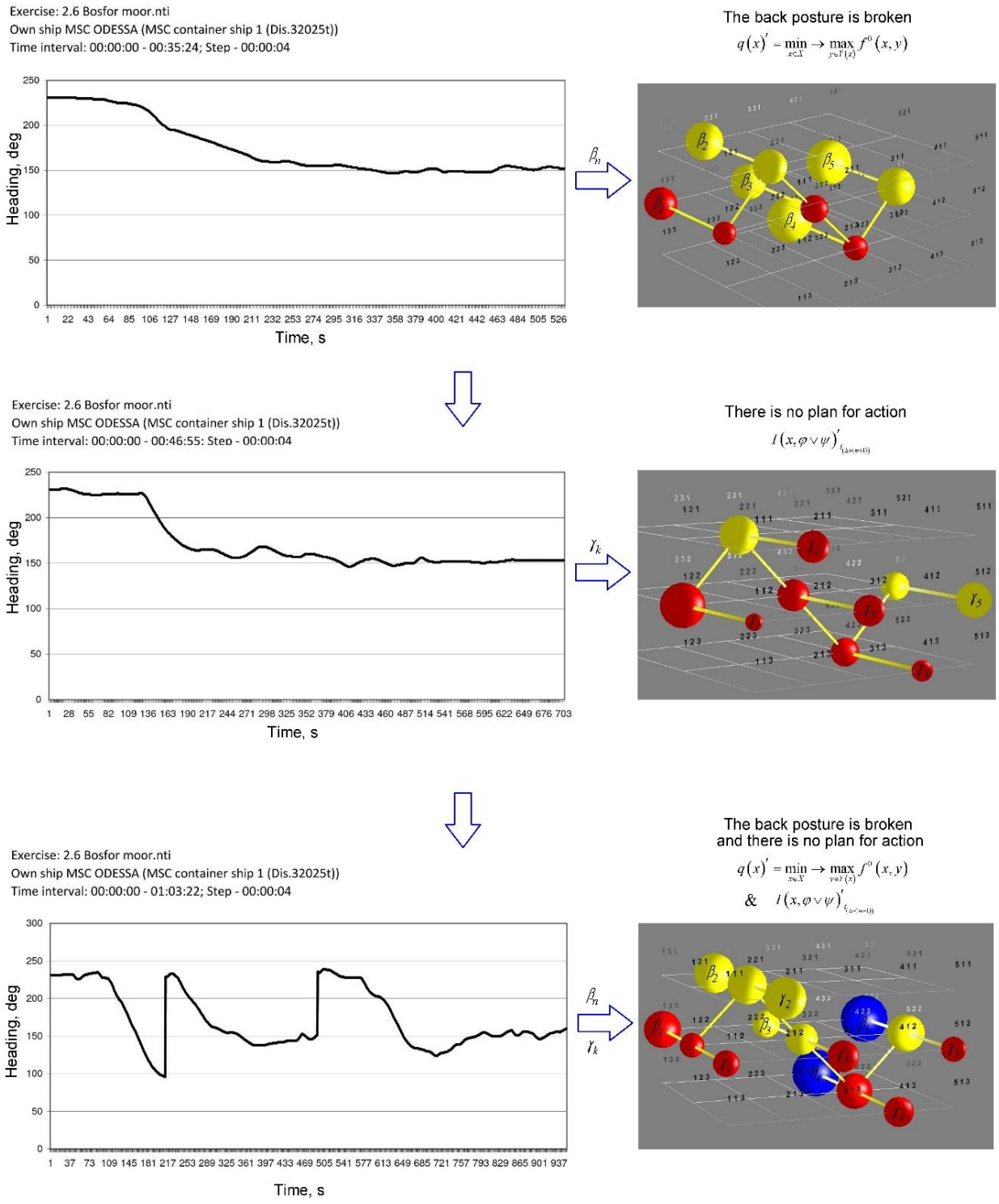
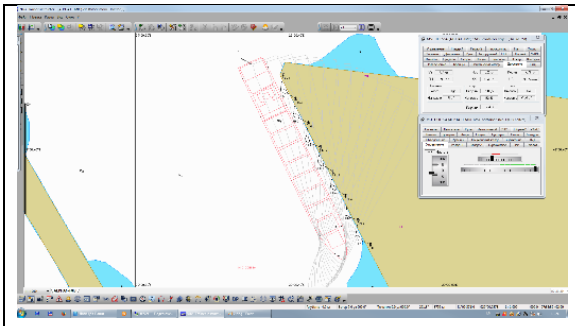
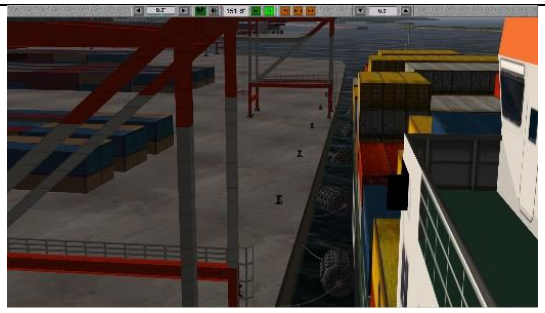
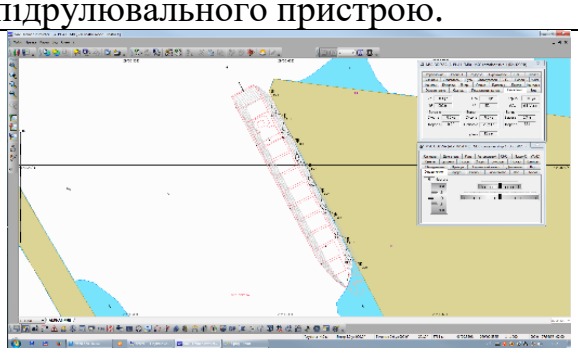
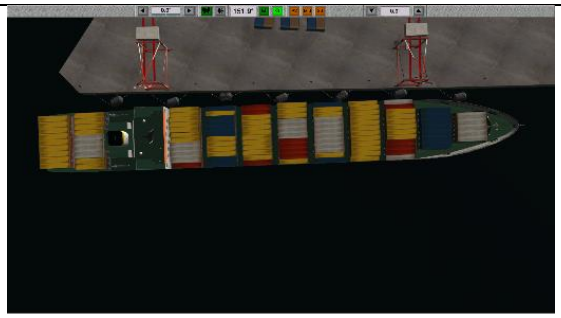
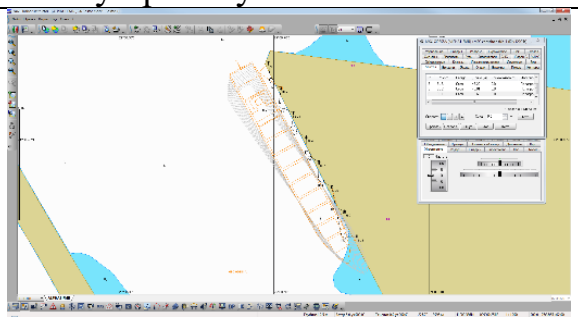
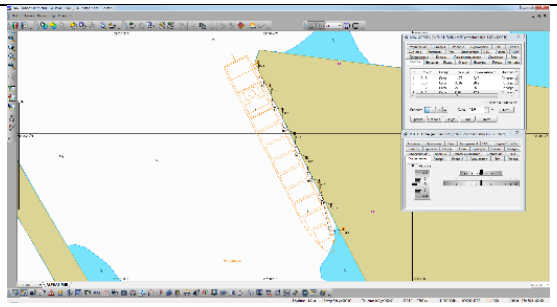
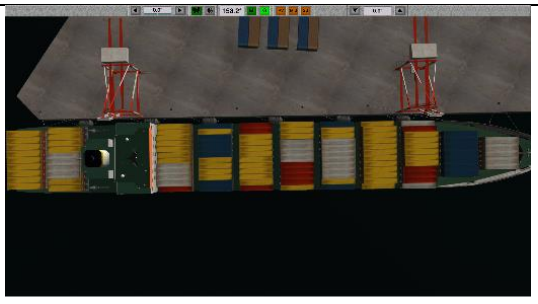


Рисунок 6.39. Візуалізація непрямих ознак функціонального виснаження

На рисунку 6.39 показано, що непрямі ознаки функціонального виснаження проявлялися через зміну траєкторії дій, часові затримки, повторні звернення до інформаційних елементів і зміни мікрореакцій. Наявні результати були використані як експериментальне підтвердження можливості фіксації операторських змін у структурі дій.

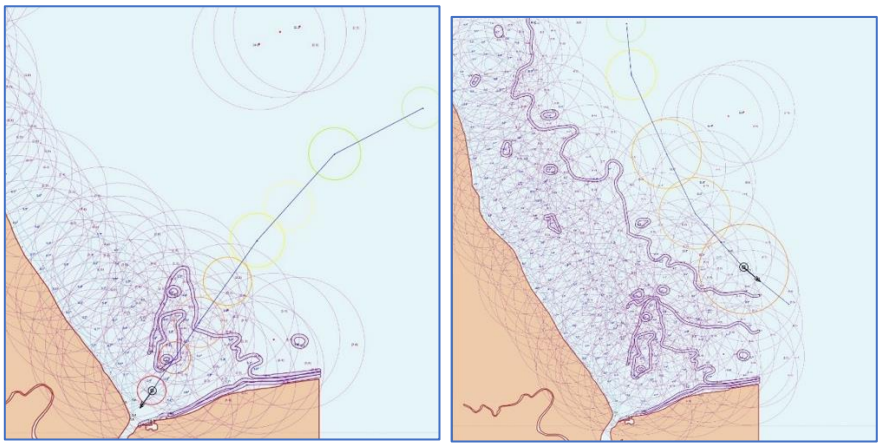
Таблиця 6.12. Експериментальна перевірка на базі навігаційного тренажера

	
07.33.30 За зменшення швидкості (задній малий хід) гвинту фіксованого кроку правого обертання забезпечує зміщення корми до причалу, яке додатково коригується за допомогою носового підрулювального пристрою.	
	
07.36.30 Судно практично не має ходу та перебуває біля кранцевого захисту причалу.	
	
07.38.50 Подача носових і кормових швартових кінців.	
	
07.46.00 Натягування носових і кормових швартових кінців і фіксація.	

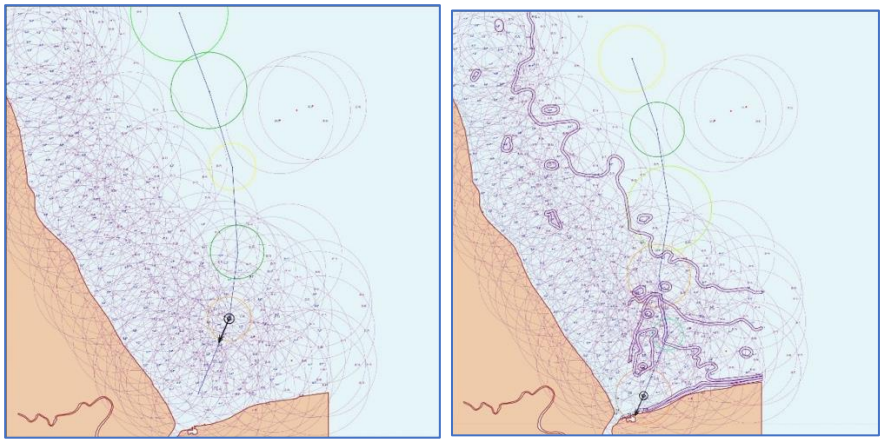
Отже, експериментально було підтверджено можливість включення функціонального стану оператора до контуру ІСНЗ через систему непрямих,

синхронізованих ознак. Було показано, що траєкторні, часові, поведінкові, фізіологічні та термографічні дані підвищили інформативність аналізу. У такій постановці оператор був представлений як активний функціональний елемент ергатичного контуру, стан якого проявлявся через вимірювані або розрахункові ознаки та міг бути врахований у подальшій інтеграції результатів у ІСНЗ, МАІКС і сценарно-імітаційній перевірці інтегрального показника ризику.

Багатофакторне визначення функціонального стану оператора дало змогу розробити модуль для картографічної візуалізації інтегральної оцінки в контурі ІСНЗ. Основною функцією модуля стало просторове поєднання стану оператора із траєкторією руху судна, районом плавання та навігаційною обстановкою. Такий підхід дав змогу розглядати людський фактор не як ізольований числовий показник, а як просторово локалізований елемент функціонування ІСНЗ, який може впливати на ризик втрати стійкості керування. Експериментальне відображення виконувалося на електронній навігаційній карті району Lake Huron – Port Huron and Sarnia, Michigan, USA – Canada. За характером навігаційної обстановки цей район поєднує відкриту водну ділянку, прибережний підхід, берегову межу, мілководні зони, навігаційні об’єкти та ділянки підвищеної відповідальності оператора. Тому він є придатним для перевірки інтегрального індикатора стану оператора у складних умовах.



а *б*



в *г*

Рисунок 6.40. Фрагменти роботи програмного ідентифікатора інтегрального психофізіологічного стану оператора на електронній навігаційній карті району Port Huron-Sarnia: *а–г* – варіанти просторового відображення стану вздовж контрольної траєкторії руху судна

На рисунку 6.40 показано контрольну траєкторію руху судна. Уздовж цієї траєкторії розміщено кругові маркери різних кольорів і радіусів, які відображають змодельовану інтегральну оцінку психофізіологічного стану оператора. Колір маркера характеризує якісний стан оператора: від зеленого, що відповідає відносно спокійному або стабільному стану, до червоного, який відображає підвищений рівень функціонального напруження або ризикового операторського стану, і який потребує подальшої контекстної та експертної інтерпретації. Радіус кола характеризує інтенсивність впливу цього стану на ризик втрати керованості.

У такій інтерпретації I_{HF} є нормованою інтегральною оцінкою прояву людського фактора, а r_{rel} – відносним радіусом маркера, нормованим до максимального значення у відповідному сценарії. Для практичної реалізації в програмному модулі ІСНЗ радіус маркера може задаватися співвідношенням:

$$r_i = r_{\min} + \left(r_{\max} - r_{\min}\right) \cdot I_{HF,i}, \tag{6.32}$$

$$r_{(rel,i)} = \frac{r_i - r_{(min)}}{r_{(max)} - r_{(min)}} = I_{(HF,i)} \tag{6.33}$$

де r_i – радіус маркера для i-го фрагмента маршруту; $r_{\min}$ – мінімальний радіус для стабільного стану; $r_{\max}$ – максимальний радіус для критичного стану; $I_{HF,i}$

– інтегральна оцінка психофізіологічного стану оператора у відповідній точці траєкторії.

На фрагменті *а* наведено загальне накладання маркерів стану оператора на електронну навігаційну карту. Уздовж траєкторії спостерігався перехід від зелених і жовто-зелених маркерів до жовтих і помаранчевих, що відповідає поступовому зростанню функціонального навантаження під час руху в напрямку навігаційно насиченої ділянки.

На фрагменті *б* контрольна траєкторія проходила від більш відкритої акваторії до району прибережно-портової зони. Уздовж маршруту спостерігалася послідовність маркерів від зеленого до жовтого та помаранчевого спектрів. Причиною такого ефекту було збільшення кількості контрольованих навігаційних параметрів, потреба у частішому звірянні з ECDIS, RADAR/ARPA та AIS, а також у підготовці до маневрування в більш обмеженій акваторії.

На фрагменті *в* найбільш виражені маркери жовто-помаранчевого спектра зосереджені на ділянці, де траєкторія наближається до зони з більшою навігаційною складністю. Це відповідало стану, за якого оператор працював за умов підвищеної інформаційної щільності: необхідно контролювати безпечний курс руху, глибини, межі фарватеру, навігаційні об’єкти та можливі відхилення від маршруту. У цій ситуації зростання радіуса маркерів відображає не саму складність району плавання, а реакцію оператора на цю складність – підвищення напруження, ущільнення циклів спостереження та потенційне зменшення запасу операторської стійкості.

На фрагменті *г* маркери розташовані вздовж майже вертикального фрагмента контрольної траєкторії. Переважання зелених і жовто-зелених маркерів вказує на відносно контрольований режим роботи оператора, однак поява більших жовтих маркерів свідчить про окремі фрагменти підвищеного функціонального навантаження. Такі ділянки пов’язані з уточненням положення судна, підготовкою до зміни курсу, контролем безпечної дистанції до мілководдя або необхідністю частішого звернення до навігаційних засобів.

Отримані результати підтвердили придатність кольорово-радіусного

подання для просторової візуалізації психофізіологічного стану оператора як просторово локалізованого індикатора у контурі ІСНЗ. Найбільш інформативною є послідовність маркерів уздовж траєкторії, оскільки вона дає змогу виявити не лише окремий момент напруження, а й просторову динаміку переходу від стабільного стану до підвищеного або передкритичного навантаження.

6.6. Сценарно-імітаційне моделювання інтегрального показника впливу людського фактора на ризик функціонування ІСНЗ

Завершальним етапом інтеграційної перевірки стало сценарно-імітаційне моделювання інтегрального показника впливу людського фактора на ризик ІСНЗ – $I_{HF \to R}$. Його метою було не відтворення одиничної навігаційної події, а перевірка того, чи забезпечував інтегральний показник впорядковане розрізнення режимів функціонування ІСНЗ у широкому діапазоні сценаріїв: від стабільних до критичних. Для цього було використано моделювання методом Монте-Карло за шістьма сценаріями з послідовним зростанням складності.

Для чисельної апробації запропонованої інтегральної моделі впливу людського фактора на зростання ризику інформаційної системи навігаційного забезпечення було сформовано шість сценаріїв, що відображали типові та практично значущі режими експлуатації судна: денний перехід у відкритому морі, прибережний підхід, перетин системи розподілу руху, нічне лоцманське проведення в обмежених водах, рух за умов обмеженої видимості та аварійно небезпечний штормовий режим у вузькому каналі [218, 254, 259, 261, 263, 265]. Такий набір сценаріїв забезпечив поетапне зростання інформаційного навантаження, складності маневрування, рівня зовнішніх збурень і відповідальності оператора, що створило необхідні умови для перевірки адекватності інтегрального показника в широкому діапазоні функціональних станів системи.

Інтегральна сценарно-імітаційна верифікація завершує експериментальний контур Розділу 6. Її мета полягає у перевірці того, чи

можуть часткові індикатори, отримані на попередніх рівнях, бути об’єднані в єдиний показник впливу людського фактора на ризик ІСНЗ.

Інтегральний показник формується за чотирма складовими:

$$E(t), \quad C(t), \quad S(t), \quad U(t) \tag{6.34}$$

де $E(t)$ – епізодна траєкторна складова; $C(t)$ – когнітивно-часова складова; $S(t)$ – динаміко-стабілізаційна складова; $U(t)$ – керувально-ризикова складова.

Динаміко-стабілізаційний шар визначається через показники

$$k_{eff}(t) = mGl - mhgh \cdot z_h(t), \tag{6.35}$$

$$\mu_{st}(t) = \frac{k_{eff}(t)}{mGl}, \tag{6.36}$$

$$I_{3,eff}(t) = I_{3,0}(1 - \alpha_I z_h(t)), \tag{6.37}$$

$$\omega_{3,eff}(t) = \omega_{3,0}(1 - \alpha_\omega z_h(t)), \tag{6.38}$$

$$L_{eff}(t) = I_{3,eff}(t)\omega_{3,eff}(t), \tag{6.39}$$

$$\Omega(t) = \frac{M_{dem}(t)}{L_{eff}(t)}. \tag{6.40}$$

У сценарному ускладненні має виконуватися логіка:

$$\mu_{st} \downarrow, \qquad L_{eff} \downarrow, \qquad \Omega \uparrow, \qquad R_{dynamic} \uparrow. \tag{6.41}$$

Це забезпечує зв’язок підрозділу 6.6 з аналого-індикаторною моделлю стійкості розділу 2.

Інтегральний показник визначається як:

$$I_{HF\to R}(t) = \sigma\begin{pmatrix} \theta_0 + \theta_E E(t) + \theta_C C(t) + \theta_S S(t) + \theta_U U(t) + \theta_{EC} E(t)C(t) + \\ +\theta_{CS} C(t)S(t) + \theta_{SU} S(t)U(t) + \theta_{EU} E(t)U(t) \end{pmatrix}, \tag{6.42}$$

де $\sigma(x) = \dfrac{1}{1+e^{-x}}$, $0 \le I_{HF\to R}(t) \le 1$. (6.43)

Monte Carlo-перевірка подається як:

$$\mathcal{M}_{MC} : \Theta_s(t) \to [\mathbb{E}(I_{HF\to R}), Q_{0.05}, Q_{0.50}, Q_{0.95}, P_{stable}, P_{strained}, P_{critical}]. \tag{6.44}$$

Класифікація режимів виконується за правилом:

$$Mode(t) = \begin{cases} stable, & I_{HF\to R}(t) < \tau_1 \\ strained, & \tau_1 \le I_{HF\to R}(t) < \tau_2 \\ critical, & I_{HF\to R}(t) \ge \tau_2 \end{cases}. \tag{6.45}$$

Верифікаційна умова сценарного моделювання полягає у зростанні математичного сподівання інтегрального показника від простого до критичного сценарію:

$$\mathbb{E}(I \mid S_1) < \mathbb{E}(I \mid S_2) < \mathbb{E}(I \mid S_3) < \mathbb{E}(I \mid S_4) < \mathbb{E}(I \mid S_5) < \mathbb{E}(I \mid S_6). \quad (6.46)$$

Одночасно має зменшуватися ймовірність стабільного режиму та зростати ймовірність критичного режиму:

$$P_{stable}(S_1) > \ldots > P_{stable}(S_6),\ P_{critical}(S_1) < \ldots < P_{critical}(S_6). \quad (6.47)$$

Для оцінки впливу окремих змінних використовується ранговий аналіз чутливості:

$$\rho_S(X_j, I_{HF \to R}), \quad (6.48)$$

де $X_j \in \{E, C, S, U, z_h, \mu_{st}, L_{eff}, \Omega, R_{dynamic}\}$. (6.49)

Домінування цих змінних у рейтингу чутливості підтверджує, що інтегральний показник реагує саме на ті фактори, які були визначені у попередніх розділах як ключові для ризику ІСНЗ.

Формальний підсумок цього етапу має вигляд:

$$E(t), C(t), S(t), U(t) \to I_{HF \to R}(t) \to Mode(t) \to [P_{stable}, P_{strained}, P_{critical}] \to U_{ISNZ}(t). \quad (6.50)$$

Практичне використання результату полягає у сценарному ранжуванні навігаційних ситуацій, визначенні ймовірності переходу ІСНЗ до напруженого або критичного режиму, оцінюванні стійкості результату для параметричної невизначеності, виявленні найбільш впливові фактори та обґрунтуванні керувальних або рекомендаційних дій.

У межах кожного сценарію було задано часові ряди параметрів, які характеризуються внутрішнім станом оператора, зовнішнім збуренням та умовами керування. Зокрема, було враховано координату центра ваги людського фактора $z_h(t)$, зовнішній збурювальний вплив $M_{ext}(t)$, момент необхідних корекцій $M_{dem}(t)$, кутову характеристику $\theta^*(t)$, а також часткові фактори $E(t)$, $C(t)$, $S(t)$ і $U(t)$. Крім того, для кожного сценарію було сформовано первинні масиви епізодичних, когнітивно-часових і керувально-ризикових даних, що дало змогу реалізувати розрахунок інтегрального показника.

У таблиці 6.13 наведено початкову конфігурацію сценарно-імітаційного моделювання та визначено фізичний і операційний контекст подальшого аналізу. Її зміст показує, що сценарії були побудовані за логікою послідовного ускладнення умов функціонування ІСНЗ: від відкритого моря з низьким рівнем навантаження до штормового руху у вузькому каналі з критичним рівнем невизначеності та високою частотою вимушених коригувальних дій. Саме така побудова дає змогу інтерпретувати отримані результати як оцінки, прив’язані до реальних навігаційних ситуацій.

Числова апробація інтегрального показника була виконана методом Монте-Карло, що дало змогу врахувати параметричну та сценарну невизначеність під час моделювання впливу людського фактора на ризик функціонування ІСНЗ.

Таблиця 6.13. Початкові параметри сценарно-імітаційного моделювання впливу людського фактора на зростання ризику інформаційної системи навігаційного забезпечення

Сценарій	**Рівень ризику**	**Навігаційна ситуація**	**Операційна інтерпретація режиму**
S1_open_sea_day	Низький	Денний перехід у відкритому морі, добра видимість, низька інтенсивність руху, штатні умови несення вахти	Базовий контрольований режим функціонування з мінімальним когнітивним навантаженням
S2_coastal_approach	Помірний	Прибережний підхід, збільшення кількості навігаційних об’єктів, помірне транспортне навантаження	Зростання інформаційного навантаження та потреба в більш щільному моніторингу ситуації
S3_tss_crossing	Помірно високий	Перетин системи розподілу руху, щільний перехресний рух суден	Напружений режим несення вахти з високою відповідальністю за прийняття рішень
S4_pilotage_night	Високий	Нічне лоцманське проведення у вузькому фарватері / обмежених водах	Ризик дефіциту уваги та високий рівень відповідальності під час лоцманського проведення

Продовження таблиці 6.13.

S5_restricted_ visibility	Дуже високий	Рух за умов обмеженої видимості в районі інтенсивного судноплавства, різке зростання невизначеності	Високий рівень невизначеності, значне часове та когнітивне напруження
S6_storm_channel_ emergency	Критичний	Штормовий підхід у вузькому каналі, режим, наближений до аварійного	Критичний режим, близький до втрати системної стійкості

На кожній ітерації моделі варіювалися вагові коефіцієнти часткових факторів, параметри взаємодії в інтегральній моделі, а також ключові вхідні змінні, пов’язані з людським фактором і зовнішніми умовами функціонування системи. У результаті для кожного сценарію було отримано середнє значення інтегрального показника $I_{HF \to R}$, його квантильні межі, а також імовірності переходу системи до стабільного, напруженого та критичного режимів.

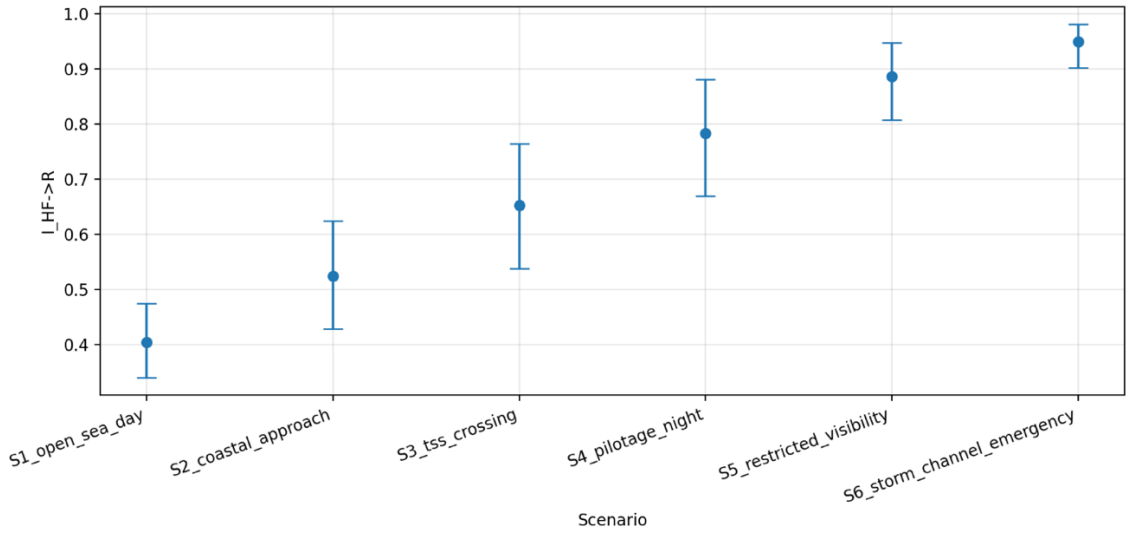


Рисунок 6.41. Середні значення інтегрального показника впливу людського фактора на зростання ризику ІСНЗ за сценаріями з квантильними межами $Q_{0,05}$–$Q_{0,95}$

На рисунку 6.41 відображено основний інтегральний результат імітаційного моделювання. Він демонструє чітке монотонне зростання середнього значення $I_{HF \to R}$ від першого до шостого сценарію. Для сценарію S1_open_sea_day середнє значення інтегрального показника становить

близько 0,404; для S2_coastal_approach – 0,524; для S3_tss_crossing – 0,652; для S4_pilotage_night – 0,783; для S5_restricted_visibility – 0,887; для S6_storm_channel_emergency – 0,950. Такий характер зміни вказує на високу чутливість показника до ускладнення навігаційної ситуації та підтверджує, що інтегральна модель адекватно відображає зростання ризикоутворювального впливу людського фактора. Водночас квантильні межі демонструють, що навіть з урахуванням варіативності Монте-Карло зберігається коректне впорядкування сценаріїв за рівнем ризику.

Таблиця 6.14. Узагальнені результати моделювання методом Монте-Карло інтегрального показника $I_{HF \to R}$ за сценаріями навігаційних ситуацій

Сценарій	**I_mean**	**I_std**	**I_q05**	**I_q50**	**I_q95**
S1_open_sea_day	0,40426	0,041426	0,340121	0,402722	0,474752
S2_coastal_approach	0,523952	0,061069	0,428373	0,522832	0,62475
S3_tss_crossing	0,652503	0,070849	0,537867	0,653576	0,763895
S4_pilotage_night	0,783486	0,067119	0,669478	0,788845	0,881601
S5_restricted_visibility	0,886972	0,044208	0,807186	0,89319	0,947613
S6_storm_channel_emergency	0,949974	0,025061	0,902474	0,955075	0,981304

За таблицею 6.14 чисельно підтверджуються висновки, зроблені відповідно до рисунку 6.41, що дає змогу точніше оцінити межі варіативності. Зокрема, для першого сценарію квантильний інтервал становить приблизно 0,340–0,475, тоді як для шостого – 0,902–0,981. Це означає, що зі зростанням сценарного ризику збільшується не лише середнє значення інтегрального показника, а й уся область його ймовірних реалізацій зміщується в бік критичних значень. Ця властивість є важливою для практичного використання моделі, оскільки дає змогу інтерпретувати її не лише через середні оцінки, а й через квантильні межі розподілу інтегрального показника.

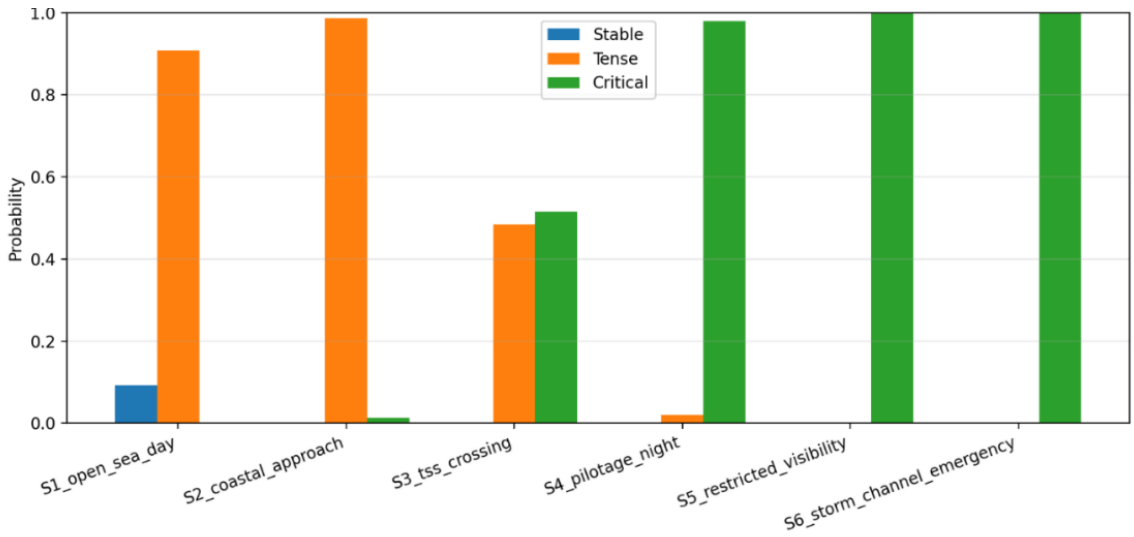


Рисунок 6.42. Імовірності перебування інформаційної системи навігаційного забезпечення у стабільному, напруженому та критичному режимах функціонування за результатами моделювання методом Монте-Карло

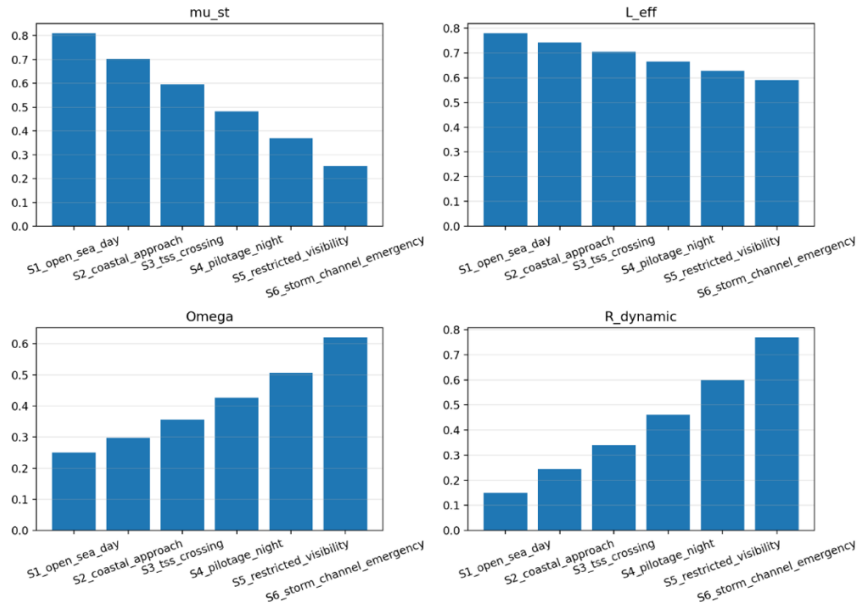
Рисунок 6.42 демонструє інтерпретацію інтегрального показника. Для сценарію S1_open_sea_day домінує напружений режим із незначною часткою стабільного режиму, тоді як критичний режим практично не реалізується. Для S2_coastal_approach напружений режим переважає, однак з'являється незначна частка критичних реалізацій. У сценарії S3_tss_crossing система перебуває у перехідній області, у якій напружений і критичний режими мають близькі ймовірності. Починаючи зі сценарію S4_pilotage_night, критичний режим уже стає майже повністю домінантним, а для S5_restricted_visibility і S6_storm_channel_emergency фактично досягає одиничної ймовірності. Таким чином, інтегральний показник є придатним не лише для кількісного оцінювання, а й для класифікації режимів функціонування системи та ідентифікації порогу переходу до небезпечного стану.

Змістовно важливим є те, що перехід до критичного режиму спостерігається не стрибкоподібно, а через проміжний напружений стан, що відповідає закономірній динаміці управління рухом судна. Це підтверджує коректність режимної шкали моделі та її придатність для сценарного прогнозування.

Таблиця 6.15. Середні значення часткових факторів $E(t)$, $C(t)$, $S(t)$, $U(t)$ і параметрів динамічної стійкості за сценаріями

Сценарій	***E_mean***	***C_mean***	***S_mean***	***U_mean***	***mu_st_ mean***	***L_eff_ mean***	***Omega_ mean***	***R_ dynamic mean***
S1_open_sea_day	0,163	0,132	0,134	0,112	0,811	0,780	0,250	0,150
S2_coastal_approach	0,265	0,226	0,249	0,209	0,703	0,741	0,297	0,245
S3_tss_crossing	0,383	0,328	0,369	0,305	0,595	0,704	0,356	0,340
S4_pilotage_night	0,522	0,459	0,500	0,426	0,482	0,665	0,426	0,460
S5_restricted_visibility	0,688	0,598	0,638	0,565	0,370	0,628	0,507	0,600
S6_storm_channel _emergency	0,835	0,748	0,798	0,744	0,253	0,590	0,621	0,770

Дані з таблиці 6.15 виконують функцію внутрішньої декомпозиції інтегрального показника. Вони демонструють, що під час переходу від першого до шостого сценарію зростають не лише інтегральні оцінки, а й усі основні часткові компоненти. Зокрема, середнє значення зростає: для епізодичного фактора приблизно від 0,163 до 0,835, для когнітивно-часового фактора від 0,132 до 0,748, для фактора динамічної стійкості від 0,134 до 0,798, а для фактора керувального ризику від 0,112 до 0,744. Таким чином, зростання інтегрального показника формується не одним локальним механізмом, а внаслідок погіршення траєкторно-епізодного, когнітивно-часового, динаміко-стабілізаційного та керувально-ризикового компонентів.



Рисунки 6.43. Зміна середніх значень параметрів динамічної стійкості за сценаріями: а – μ_{st}; б – L_{eff}; в – Ω; г – $R_{dynamic}$

Рисунки 6.43 а–г підтверджують узгодженість інтегральної моделі з базовим динамічним апаратом. На рисунку 6.43а показано послідовне зменшення відносного запасу стійкості μ_{st} від 0,811 для S1_open_sea_day до 0,253 для S6_storm_channel_emergency. Це означає, що зі зростанням впливу людського фактора система втрачає здатність підтримувати стійкий режим без посилення коригувальних дій.

Рисунок 6.43б демонструє аналогічне зменшення ефективного резерву функціонування L_{eff} приблизно від 0,780 до 0,590. Це вказує на деградацію функціонального ресурсу системи та підтверджує, що людський фактор у моделі виступає не як зовнішній коментар, а як внутрішній параметр, який змінює розрахункові характеристики динаміки моделі.

Рисунок 6.43в показує зростання частоти вимушених корекцій Ω від 0,250 до 0,620. Отже, у міру погіршення сценарію система дедалі частіше змушена компенсувати втрату стійкості за допомогою активних керувальних дій. Нарешті, рисунок 6.43 г показує зростання динамічного ризику $R_{dynamic}$ від 0,150 до 0,770, тобто від низького ризику до виразно критичного рівня. У сукупності ці чотири рисунки підтверджують, що інтегральний показник $I_{HF\to R}$ узгоджується з динамічною природою системи та відображає модельний механізм переходу від стійкого до ризикового режиму.

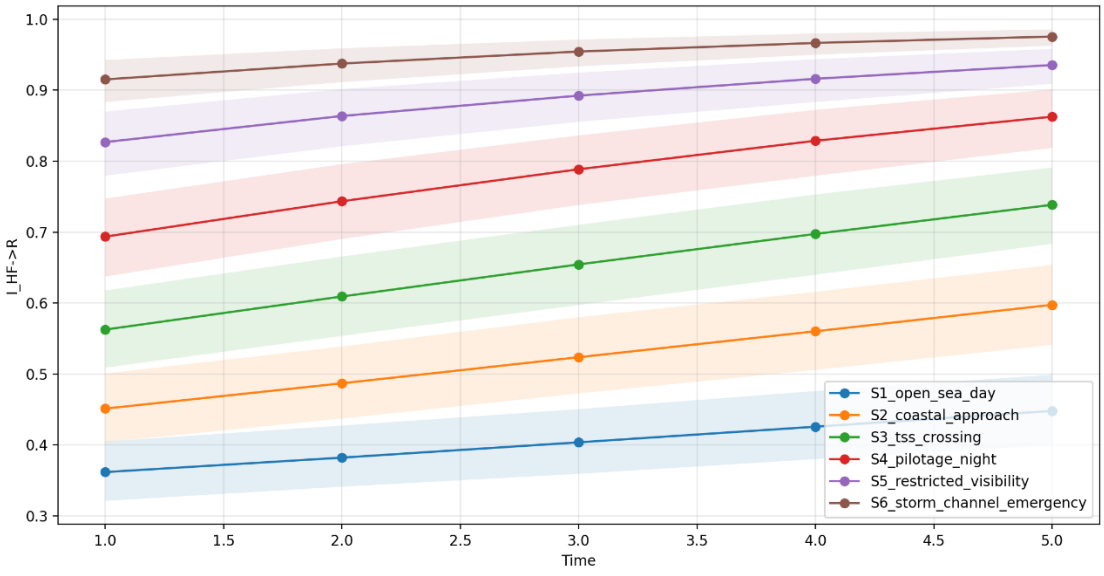


Рисунок 6.44. Часова еволюція інтегрального показника $I_{HF\to R}$ у шести сценаріях функціонування ІСНЗ

Рисунок 6.44 демонструє, що інтегральний показник змінюється не лише між сценаріями, а й у часі в межах кожного з них. Для сценаріїв із низьким рівнем ризику зростання $I_{HF \to R}$ є помірним, тоді як для сценаріїв із високим і критичним рівнями ризику криві характеризуються вираженим зростанням і більшою варіативністю. Це означає, що модель придатна не лише для статичного порівняння умов функціонування, а й для динамічного сценарного моніторингу розвитку ситуації. Саме ця властивість є принципово важливою для ІСНЗ, у яких необхідно не лише фіксувати вже сформований небезпечний стан, а й заздалегідь відстежувати траєкторію його наближення.

Таблиця 6.16. Імовірності перебування ІСНЗ у стабільному, напруженому та критичному режимах функціонування

Сценарій	P_stable	P_strained	P_critical
S1_open_sea_day	0,0916	0,9084	0
S2_coastal_approach	0	0,986933	0,013067
S3_tss_crossing	0	0,485	0,515
S4_pilotage_night	0	0,0196	0,9804
S5_restricted_visibility	0	0	1
S6_storm_channel_emergency	0	0	1

Таблиця 6.16 дає змогу детально простежити зміну режимної структури ІСНЗ. У межах запропонованої класифікації напружений режим не ототожнюється з критичним або аварійним станом, а відповідає робочо-напруженому контрольованому функціонуванню системи, за якого ІСНЗ потребує штатного моніторингу та збереження підвищеної уваги оператора, але не переходить до критичного режиму. Саме тому для сценарію S1_open_sea_day частка напруженого режиму становить 0,9084 за відсутності критичних реалізацій, що відображає не небезпечність сценарію, а базовий операційний рівень активного навігаційного контролю. Для другого сценарію частка критичного режиму вже становить приблизно 0,013; для третього – 0,515; для четвертого – 0,980; а для п’ятого і шостого досягає одиниці. Таким чином, модель забезпечує кількісне подання переходу ІСНЗ від контрольованого робочо-напруженого режиму до критичного режиму зі зростанням складності навігаційної ситуації.

Таблиця 6.17. Результати аналізу чутливості інтегрального показника $I_{HF\to R}$ до варіацій основних параметрів моделі

Змінні	**spearman_rank_corr**
E	0,988951957
$R_{dynamic}$	0,98870102
U	0,988598384
C	0,988598384
S	0,985383299
z_h	0,982032815
μ_{st}	0,982032815
L_{eff}	0,982032815
Ω	0,956732892
θ_E	0,051237313
θ_C	0,046449323
θ_S	0,040946005
θ_U	0,038674436

Таблиця 6.17 демонструє результати аналізу чутливості та є важливим аргументом на користь внутрішньої математичної узгодженості моделі.

Найсильніший ранговий зв'язок з інтегральним показником мають епізодичний фактор E ($\rho \approx 0{,}989$), динамічний ризик $R_{dynamic}$ ($\rho \approx 0{,}989$), когнітивно-часовий фактор C ($\rho \approx 0{,}988$), фактор керувального ризику U ($\rho \approx 0{,}988$) та фактор динамічної стійкості S ($\rho \approx 0{,}986$).

Високі значення рангової кореляції також отримано для координати центра ваги людського фактора z_h, запас стійкості μ_{st}, ефективний резерв L_{eff} і частота вимушених корекцій Ω. Водночас випадкові варіації окремих вагових коефіцієнтів θ_E, θ_C, θ_S, θ_U мають значно менший локальний внесок, що свідчить про переважний зв'язок інтегрального показника зі змістовними фізико-поведінковими компонентами моделі.

Отже, аналіз підтверджує, що інтегральний показник є найбільш чутливим саме до тих факторів, які теоретично були покладені в основу моделі: поведінкового, когнітивно-часового, динаміко-стабілізаційного та керувально-ризикового. Це свідчить про узгоджений напрям зміни інтегрального показника та ключових параметрів моделі та реагує на зміну ключових параметрів.

Таким чином, сукупність результатів, наведених у таблицях 6.13–6.17 та на рисунках 6.41–6.44, підтверджує внутрішню узгодженість і сценарну чутливість запропонованої інтегральної моделі. По-перше, зі зростанням сценарного ризику спостерігається монотонне зростання інтегрального показника. По-друге, ця тенденція узгоджується зі зменшенням запасу стійкості та резерву функціонування, а також зі зростанням частоти вимушених коригувань і динамічного ризику. По-третє, ймовірнісна інтерпретація результатів демонструє закономірний перехід системи від стабільних і напружених режимів до критичного режиму.

6.7. Експертна система валідації LOG-проходів як завершальний контур експериментальної перевірки моделей ІСНЗ

Завершальним етапом експериментальної перевірки результатів дисертаційного дослідження стало формування діалогової експертної системи для валідації LOG-проходів ІСНЗ. Її призначення полягає в поєднанні автоматизованого аналізу траєкторних, керувальних і просторових ознак із зовнішньою інструкторською оцінкою стану оператора, рівня ризику, критичних епізодів та придатності проходу до використання у підсумковій верифікації.

Експериментальна база включала понад 300 тренажерних траєкторій проходження складних навігаційних ділянок. Із цієї сукупності було відібрано 78 LOG-проходів, у яких спостерігалися ознаки прояву людського фактора: нестійкість керувальних дій, затримки реакції, відхилення від очікуваної траєкторії, підвищена частота корекцій, ознаки стресу, помилки ситуаційної оцінки або порушення правил розходження. Вибірка була сформована як цільова експериментальна підмножина для перевірки моделей ІСНЗ у режимах, де вплив оператора на ризик є найбільш показовим.

Формально процес відбору експериментальної підмножини подано як:

$$D_{78} = \{LOG^{(k)} \in D_{(all)} : q^{(k)} = (valid) \wedge h_{(HF)}^{(k)} \geq \theta_{(HF)}\}, \; |D_{78}| = 78, \qquad (6.51)$$

де D_{all} – повна сукупність тренажерних траєкторій; D_{78} – відібрана експериментальна підмножина; $q^{(k)}$ – ознака технічної придатності LOG-файлу; $h_{HF}^{(k)}$ – індикатор наявності ознак людського фактора; θ_{HF} – порогове значення включення проходу до верифікаційної вибірки.

Основою обробки кожного проходу є нормалізований траєкторний ряд:

$$S^{(k)} = \left\{ t_i, LAT_i, LON_i, COG_i, SOG_i, HDG_i, ROT_i, RUD_i \right\}_{i=1}^{N_k}. \tag{6.52}$$

На його основі формується вектор ознак:

$$Z^{(k)} = \begin{Bmatrix} \sigma_{COG}, \sigma_{HDG}, ROT_{mean}, ROT_{max}, RUD_{mean}, RUD_{max}, \\ chaos\_score, confidence\_index, d_{shore} \end{Bmatrix}^{(k)}. \tag{6.53}$$

Отже, експертна система реалізує завершальний доказовий перехід:

$$\begin{aligned} &LOG^{(k)} \to S^{(k)} \to Z^{(k)} \to AI\_prediction^{(k)} \to \\ &\to Expert\_validation^{(k)} \to Verified\_mode^{(k)} \end{aligned}. \tag{6.54}$$

Цей перехід синхронізує результати всіх попередніх підрозділів Розділу 6: експериментальна база LOG-файлів формується у 6.1; траєкторна мікроваріативність і chaos_score – у 6.2; ECDIS-відхилення та просторовий контекст – у 6.3; часові епізоди – у 6.4; функціональний стан оператора – у 6.5; інтегральний ризик і сценарна класифікація – у 6.6. У підрозділі 6.7 ці результати зводяться до єдиної експертно-верифікаційної матриці, яка є підсумковим програмним і доказовим виходом експериментальної частини дисертації.

На рисунку 6.45 наведено головний інтерфейс експертної системи, у якому відображаються поточний LOG-файл, попередня AI-оцінка стану, рівень ризику, коефіцієнт довіри, статус перевірки та службові параметри експерта. Система забезпечує послідовну обробку 78 LOG-проходів без ручної навігації між комірками Excel-матриці. Експерт працює з кожним проходом окремо, а результати його рішення автоматично переносяться до відповідних таблиць підсумкового файлу.

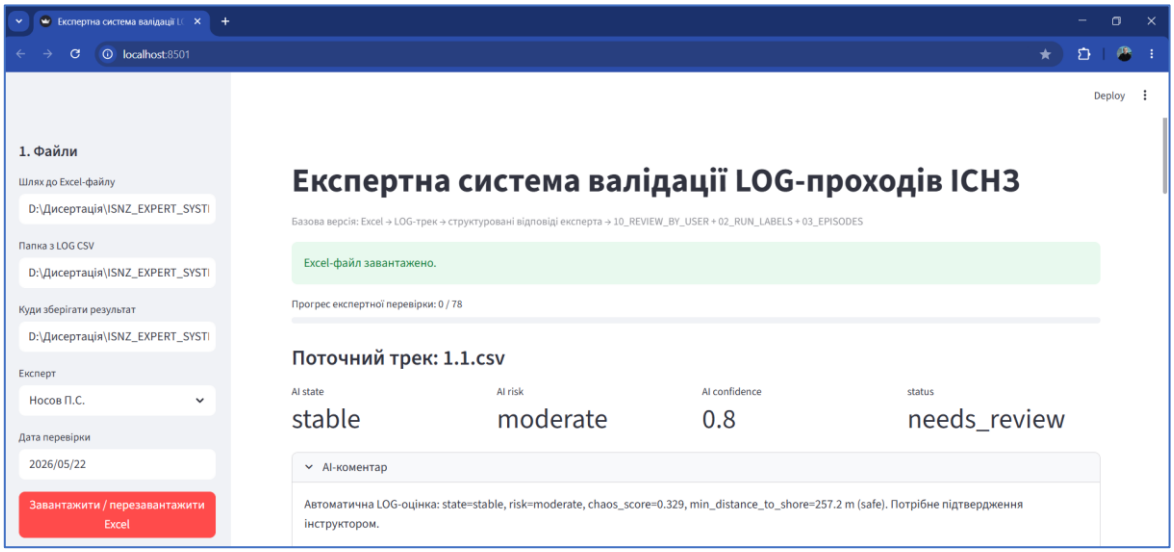


Рисунок 6.45. Загальний інтерфейс експертної системи валідації LOG-проходів ICHЗ

6.7.1. Візуально-аналітичний контур перевірки LOG-проходу

Для кожного LOG-файлу експертна система автоматично відображає траєкторію руху судна та часові профілі ключових параметрів: ROT, RUD, COG, HDG, SOG. Це дає змогу оцінити не лише підсумковий стан проходу, а й характер формування керувальних дій у часі.

Траєкторія дає змогу встановити загальну геометрію руху, наближення до берегових або навігаційно небезпечних меж, перетин контрольних ділянок і просторову логіку маневру. Профілі ROT/RUD характеризують інтенсивність і плавність керувальних дій; COG/HDG – узгодженість напряму фактичного руху і курсу судна; SOG – швидкісний режим і можливі фрагменти гальмування, розгону або нестабільності.

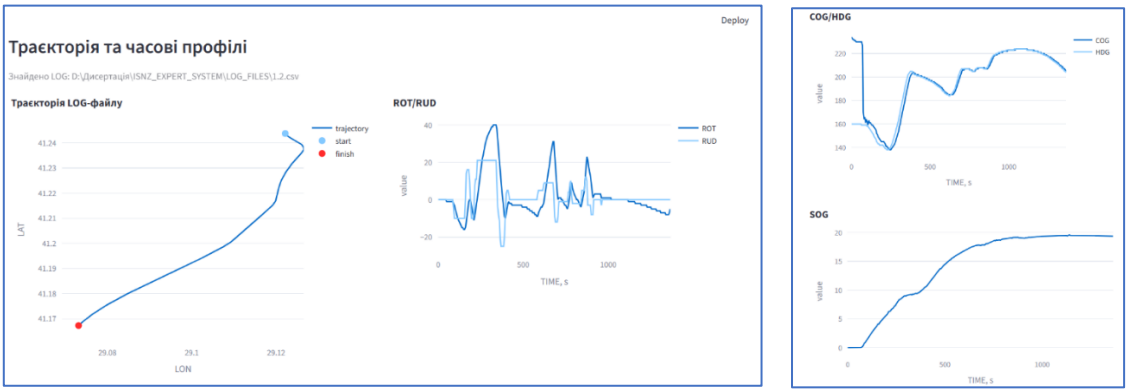


Рисунок 6.46. Відображення траєкторії LOG-файлу та часових профілів ROT/RUD, COG/HDG і SOG

На рисунку 6.46 показано аналітичний блок системи для проходу 1.2.csv. У лівій частині відображено геометрію траєкторії, а праворуч – часові профілі керувальних і навігаційних параметрів. Такий формат дає змогу експерту зіставити автоматичний прогноз із фактичними ознаками проходу та визначити, чи є підстави для підтвердження або корекції AI-оцінки.

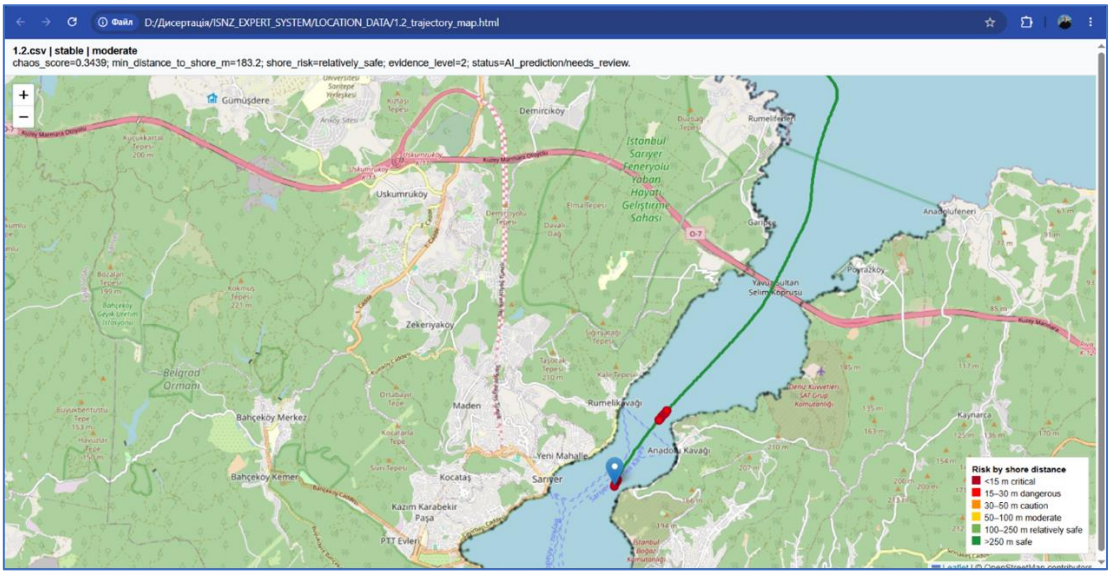


Рисунок 6.47. Картографічне подання проходу 1.2.csv у районі протоки Босфор та зони розділення руху

На рисунку 6.47 наведено картографічний фрагмент проходу 1.2.csv, у якому зафіксовано складну навігаційну ситуацію в районі протоки. Автоматичний модуль первинно класифікував цей рейс як stable / moderate, оскільки значення chaos_score = 0,3439, мінімальна відстань до берега 183,2 м та просторовий статус relatively_safe не утворювали достатньої підстави для критичної класифікації лише за LOG-параметрами. Проте аналіз карти, відеоматеріалів і додаткових факторів показав наявність критичного контексту: помилкове рішення щодо розходження із зустрічним судном, порушення схеми руху в протоці, стрес оператора та помилкові керувальні дії, що призвели до аварійного наслідку.

6.7.2. Алгоритм попереднього інтелектуального оцінювання стану та ризику LOG-проходу

У програму вбудовано модуль попереднього інтелектуального прогнозування, який виконує функцію первинної алгоритмічної класифікації

LOG-проходу. У межах цієї роботи інтелектуальний модуль не розглядається як автономна нейромережева система прийняття рішень і не замінює інструктора. Його призначення полягає у попередньому ранжуванні проходів за траєкторними, керувальними та просторово-контекстними ознаками, а також у визначенні фрагментів, які потребують пріоритетної експертної перевірки.

На першому етапі з LOG-файлу формується технічний і траєкторний опис проходу. На другому – обчислюються похідні метрики: кругові стандартні відхилення COG і HDG, середні та максимальні значення ROT і RUD, швидкісні характеристики, просторовий контекст, мінімальна відстань до берега або небезпечної межі, індекс мікроваріативності *chaos_score* та комплементарний показник *confidence_index*.

Попередня оцінка складності проходу визначається як агрегована функція трьох груп ознак:

$$AI\_score^{(k)} = \alpha C_{traj}^{(k)} + \beta C_{ctrl}^{(k)} + \gamma C_{ctx}^{(k)}, \tag{6.55}$$

$$\alpha, \beta, \gamma \geq 0,\ \alpha + \beta + \gamma = 1,\ C_{(traj)}^{(k)}, C_{(ctrl)}^{(k)}, C_{(ctx)}^{(k)} \in [0,1], \tag{6.56}$$

де $C_{traj}^{(k)}$ – траєкторна мікроваріативність; $C_{ctrl}^{(k)}$ – керувальна активність; $C_{ctx}^{(k)}$ – просторово-навігаційний контекст; α, β, γ – вагові коефіцієнти відповідних груп ознак.

Траєкторна складова формується за змінами курсових параметрів:

$$C_{traj}^{(k)} = f\left(\sigma_{COG}, \sigma_{HDG}, ROT_{mean}, ROT_{max}\right). \tag{6.57}$$

Керувальна складова враховує інтенсивність і різкість дій штурвалу:

$$C_{ctrl}^{(k)} = f\left(RUD_{mean}, RUD_{max}, ROT_{max}\right). \tag{6.58}$$

Контекстна складова враховує близькість до небезпечних меж, берегової лінії, зони розділення руху або складної навігаційної ділянки:

$$C_{ctx}^{(k)} = f\left(d_{shore}, shore\_risk, scenario\right). \tag{6.59}$$

Після формування $AI\_score^{(k)}$ виконується попередня категоризація стану:

$$AI\_state^{(k)} = \begin{cases} stable, & AI\_score^{(k)} < \theta_1, \\ strained, & \theta_1 \le AI\_score^{(k)} < \theta_2, \\ critical, & AI\_score^{(k)} \ge \theta_2. \end{cases} \quad (6.60)$$

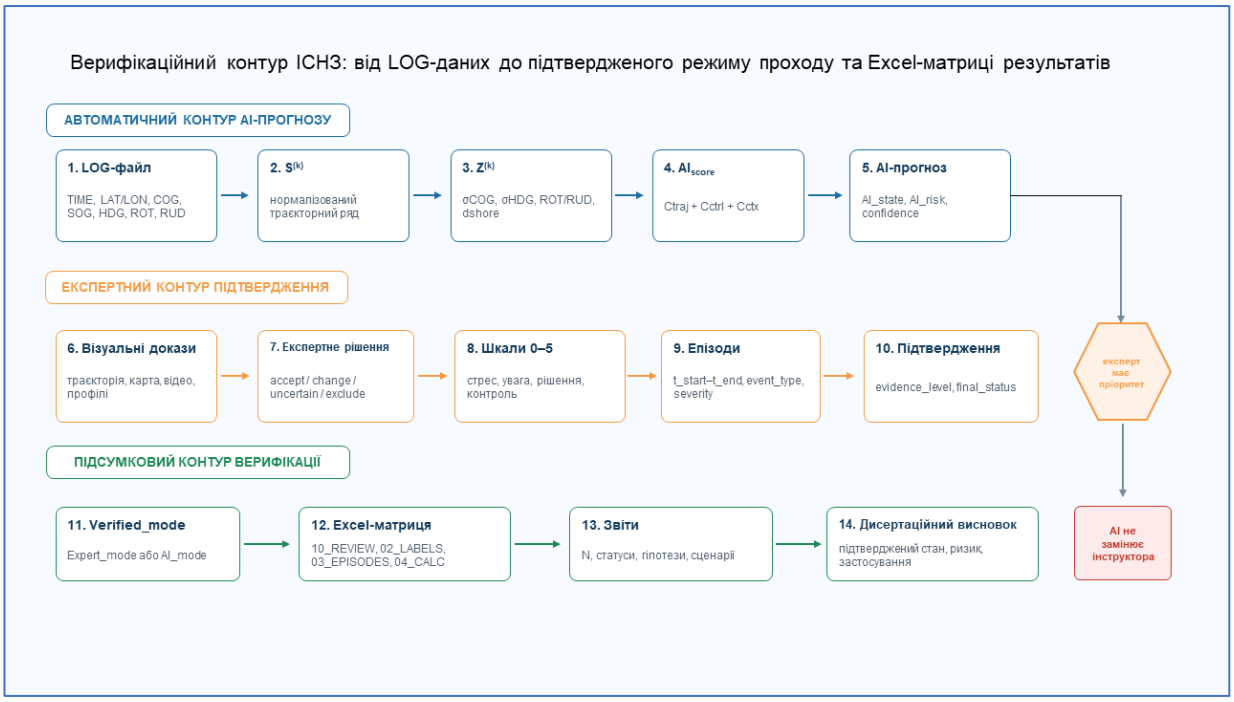


Рисунок 6.48. Алгоритм попереднього інтелектуального прогнозування та експертного підтвердження LOG-проходу

Рівень ризику визначається за поєднанням інтелектуальної оцінки, просторового контексту та сценарної складності:

$$AI\_risk^{(k)} = g\left(AI\_score^{(k)}, d_{shore}, shore\_risk, scenario\right). \quad (6.61)$$

Остаточним результатом системи є не інтелектуальне прогнозування, а верифікований режим, сформований після експертної перевірки:

$$Verified\_mode^{(k)} = \begin{cases} Expert\_mode^{(k)}, & \text{якщо експерт підтвердив або скорегував оцінку}, \\ AI\_mode^{(k)}, & \text{якщо експертне підтвердження ще не виконано}. \end{cases}$$

Це правило є принциповим: програма не підміняє інструктора, а створює попередній аналітичний шар, який проходить зовнішню експертну валідацію.

6.7.3. Робочі таблиці експертної системи

Після завершення експертної оцінки дані автоматично записуються до зведеної Excel-матриці. До підсумкового аналізу включаються лише ті вкладки, які містять робочі дані щодо LOG-проходів.

Таблиця 6.18. Робочі таблиці експертної системи, що містять дані щодо LOG-проходів

Вкладка Excel-матриці	**Обсяг даних**	**Тип даних**	**Ключові поля**	**Спосіб формування**
FINAL_EVIDENCE_TABLE	78 LOG-проходів	повний технічний паспорт проходів	Verification_ID, Source_File, Exercise, Ship, N_points, Duration_sec, Path_Length_NM, Mean_SOG, Max_SOG, Start_Lat, Start_Lon, End_Lat, End_Lon	автоматично формується з LOG-файлів
LOG_METRICS	78 LOG-проходів	зведені навігаційні та керувальні метрики	Duration_sec, Path_Length_NM, Mean_SOG, COG_Circular_Std_deg, HDG_Circular_Std_deg, Mean_abs_ROT, Max_abs_ROT, Mean_abs_RUD, Max_abs_RUD	автоматичний розрахунок із LOG CSV
DATA_QUALITY_LOG	записи за виявленими попередженнями	контроль якості даних	Source_File, Severity, Field, Issue, Recommendation	автоматично формується під час перевірки LOG-файлів
LOG_REGISTER	78 LOG-проходів	реєстр експериментальних файлів	file, scenario_group, exercise, own_ship, n_points, duration_min, step_s, SOG, ROT, RUD, HDG, COG, qc_status, scenario_6_6, evidence_level	автоматично формується і уточнюється після експертної оцінки
EXPERT_LOG_QUALITY	78 LOG-проходів	розширена якість LOG-проходів	file, n_points, duration_s, step_s, min_distance_to_shore_m, shore_risk_level, qc_status, qc_comment	автоматичний аналіз LOG і просторового контексту
MAP_INDEX	78 LOG-проходів	картографічна прив’язка проходів	file, map_png, map_html, min_distance_to_shore_m, shore_risk_level, chaos_score, overall_state, expert_risk_level, review_comment	формується під час побудови карт траєкторій
LOCATION_INDEX	78 LOG-проходів	індекс локаційних матеріалів	file, png_count, time_max, SOG, ROT, RUD, HDG, COG, has_reference_route, usable_for_6_3, usable_for_6_5, evidence_level	формується з LOG, PNG/HTML-карт і локаційних матеріалів
REVIEW_BY_USER	78 LOG-проходів	протокол інструкторської перевірки AI-прогнозу	file, overall_state_pred, expert_risk_level_pred, user_decision, user_corrected_state, user_corrected_risk, final_validation_status, evidence_level, use_in_dissertation	заповнюється експертом через діалогову систему
RUN_LABELS	78 LOG-проходів	фінальна інструкторська розмітка стану оператора	overall_state, stress_0_5, fatigue_0_5, attention_deficit_0_5, decision_quality_0_5, route_adherence_0_5, reaction_delay_0_5, situational_awareness_0_5, control_quality_0_5, critical_episode_present_0_1, expert_risk_level	автоматично заповнюється після рішення експерта

Продовження таблиці 6.18

EPISODES	226 епізодних записів	часово локалізовані епізоди	file, t_start_s, t_end_s, phase, observed_state, event_type, severity_0_5, evidence_source, linked_log_signal, instructor_confirmed_0_1	автоматично пропонується програмою, потім підтверджується або коригується експертом
CALC_INPUTS	78 LOG-проходів	розрахункові змінні для інтегральної перевірки	chaos_score, confidence_index, mean_delta_r_m, max_delta_r_m, Q_ECDIS, delay_mean_s, H_s, K_HF, I_HF_R, verified_mode, use_in_verification	частково автоматичний розрахунок, частково оновлення після експертної оцінки
HYPOTHESES	9 гіпотез	перевірка закономірностей	H1–H9, змінні, критерій, очікуваний напрям, фактичний результат, статус	заповнюється після накопичення підтверджених експертних даних
SCENARIO_MAPPING	12 сценарних груп	відповідність LOG-груп сценаріям 6.6	LOG scenario_group, Кількість файлів, Діапазон файлів, Відповідність сценарію 6.6, Рівень ризику, mapping_confidence_0_1, use_for_6_6	попередньо формується програмою, уточнюється експертом
VERIFICATION_OUTPUT	6 рівнів верифікації	підсумкова доказова таблиця	Рівень Розділу 6, N_total, N_valid, N_instructor_confirmed, N_reference_based, N_AI_only, Фактичний результат, Статус верифікації	формується після завершення експертної валідації

Дванадцять первинних груп LOG-сценаріїв агрегувалися у шість узагальнених сценаріїв S_1–S_6, використаних у підрозділі 6.6. Усі наведені таблиці формують наскрізний експериментальний протокол. Дані не дублюються вручну: експерт один раз ухвалює рішення у діалоговому інтерфейсі, після чого програма переносить його до відповідних вкладок. Це забезпечує узгодженість між інтелектуальним прогнозом, експертною оцінкою, епізодною розміткою, розрахунковими показниками та фінальним звітом.

6.7.4. Показовий приклад корекції інтелектуального прогнозу за проходом 1.2.csv

Показовим результатом роботи експертної системи є аналіз проходу 1.2.csv. Первинний інтелектуальний модуль класифікував цей рейс як:

$$AI\_state = stable, \qquad AI\_risk = moderate .$$

Підставою для такого прогнозу було те, що значення chaos_score = 0,3439 не перевищувало критичний рівень, а мінімальна відстань до берегової межі становила 183,2 м, що автоматично класифікувалося як relatively_safe. Однак інструкторський аналіз карти, відеоматеріалів і додаткових факторів виявив критичний навігаційний контекст: помилкове рішення щодо розходження із зустрічним судном, перетин або порушення ліній розділення руху в протоці, стрес оператора та помилкові керувальні дії. Тому експертна оцінка скоригувала результат: $stable / moderate \rightarrow critical / critical$.

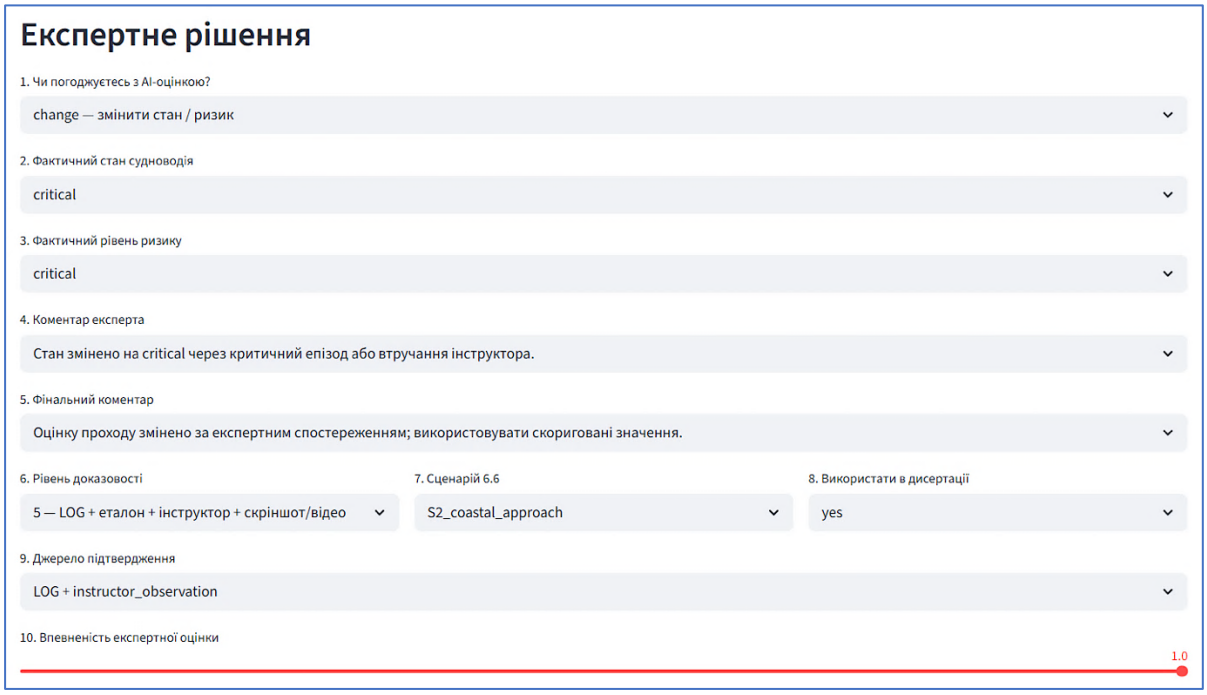


Рисунок 6.49. Корекція автоматичного прогнозу для LOG-проходу 1.2.csv

На рисунку 6.49 показано фрагмент інтерфейсу, у якому експерт обирає рішення change, змінює фактичний стан оператора на critical і фактичний рівень ризику на critical. Така корекція фіксує, що автоматична оцінка за LOG-ознаками була недостатньою для повного врахування ситуаційного контексту, порушення МПЗЗС, відеофіксації стресу та аварійного наслідку.



Рисунок 6.50. Заповнення експертних шкал стану оператора для критичного проходу 1.2.csv

На рисунку 6.50 показано заповнення шкал 0–5 для проходу 1.2.csv. Для негативних параметрів – стресу, дефіциту уваги та затримки реакції – встановлено високі значення, що відповідають наявності критичного епізоду. Для позитивних параметрів – якості рішення, дотримання маршруту, ситуаційної обізнаності та якості керування – встановлено низькі значення, що відображають некваліфіковані дії оператора у ситуації розходження.

Таблиця 6.19. Експертний профіль критичного проходу 1.2.csv

Показник	Значення	Інтерпретація
stress_0_5	5	відео та додаткові фактори підтверджують критичний рівень стресу
fatigue_0_5	2	втома не є головним фактором події
attention_deficit_0_5	4	суттєвий дефіцит уваги до ситуації розходження
reaction_delay_0_5	5	критична затримка реакції
decision_quality_0_5	0	помилкове рішення щодо розходження
route_adherence_0_5	0	порушення схеми руху / лінії розділення
communication_quality_0_5	2	недостатня ефективність комунікації
situational_awareness_0_5	1	знижена ситуаційна обізнаність
control_quality_0_5	1	помилкові керувальні дії
critical_episode_present_0_1	1	критичний епізод підтверджено

6.7.5. Епізодна розмітка критичного фрагмента

Для забезпечення часової доказовості критичний фрагмент було внесено в епізодну розмітку. Це дозволило перейти від загальної оцінки проходу до

конкретного інтервалу часу, в якому виникла помилка в ухваленні рішення через некваліфіковані дії та критичне зростання ризику.

Для проходу 1.2.csv було зафіксовано епізод:

$$t_{start} = 1095\ s, \qquad t_{end} = 1365\ s. \tag{6.62}$$

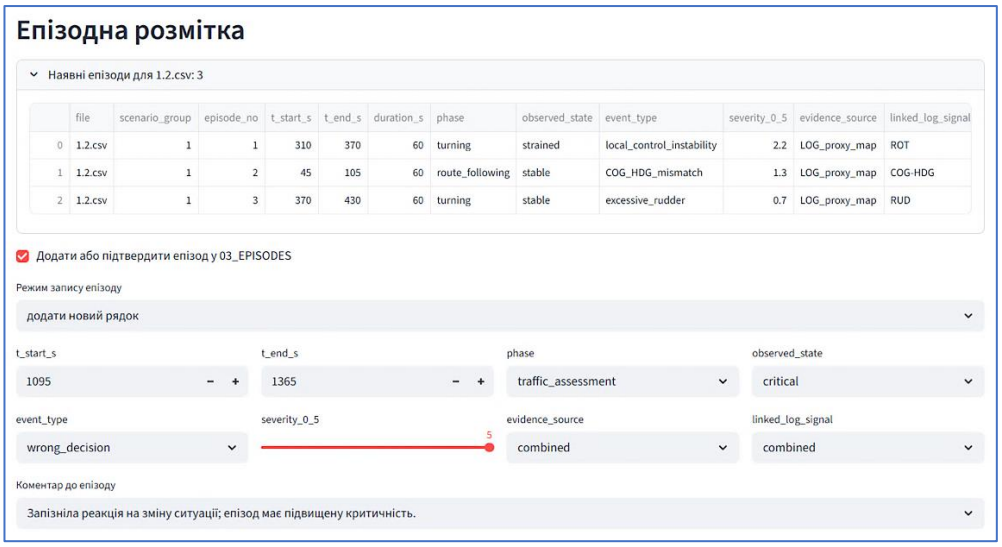


Рисунок 6.51. Епізодна розмітка критичного фрагмента проходу 1.2.csv

На рисунку 6.51 наведено внесення критичного епізоду до EPISODES. Епізод має часові межі 1095–1365 с, класифікований як wrong_decision, належить до фази traffic_assessment, має максимальну тяжкість severity_0_5 = 5, а джерело підтвердження позначено як combined. Це означає, що рішення сформоване на основі сукупності LOG-параметрів, траєкторії, карти, відеоматеріалів і інструкторського спостереження.

Таблиця 6.20. Параметри епізодної розмітки критичного фрагмента

Поле	**Значення**
file	1.2.csv
t_start_s	1095
t_end_s	1365
phase	traffic_assessment
observed_state	critical
event_type	wrong_decision
severity_0_5	5
evidence_source	combined
linked_log_signal	combined
instructor_comment	запізніла реакція на зміну ситуації; епізод має підвищену критичність
final_validation_status	instructor_confirmed
evidence_level	5

6.7.6. Автоматичне формування підсумкового звіту

Після завершення оцінки експерт натискає команду збереження, і система автоматично записує результати до файлу ISNZ_LOG_78_verification_FINAL_EXPERT_CONFIRMED.xlsx. У випадку 1.2.csv це означає, що рішення «change», скориговано стан «critical» та ризик «critical», а шкали 0–5 становлять критичний епізод і evidence level автоматично переноситься у відповідні вкладки.

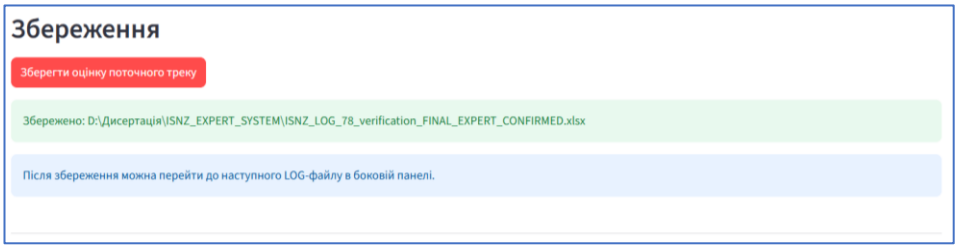


Рисунок 6.52. Збереження результатів експертної валідації до підсумкового Excel-файлу

На рисунку 6.52 показано повідомлення про успішне збереження результатів експертної оцінки. Це завершує цикл валідації одного LOG-проходу та переводить його з режиму попередньої інтелектуальної оцінки до режиму експертно підтвердженого запису верифікаційної матриці.

Узагальнений результат для проходу 1.2.csv має вигляд:

$$AI\_prediction^{(1.2)} = stable / moderate, Expert\_validation^{(1.2)} = \\ = critical / critical, Verified\_mode^{(1.2)} = critical. \quad (6.63)$$

Цей приклад демонструє принципову перевагу експертної системи: вона не лише обробляє LOG-файли, а й забезпечує формалізований механізм корекції автоматичного прогнозу на основі зовнішніх доказів. У результаті критичний рейс отримує статус corrected_by_instructor, рівень доказовості – evidence_level = 5 і використовується як показовий фрагмент завершальної верифікації моделей ІСНЗ.

6.7.7. Наукове і практичне значення експертної системи

Розроблена експертна система має подвійне значення. У науковому аспекті вона забезпечує формалізований механізм переходу від первинних LOG-даних до верифікованого висновку про стан оператора та рівень ризику.

У практичному аспекті експертна система може використовуватися в тренажерній підготовці операторів, аналізі помилок розходження, оцінюванні дотримання МПЗЗС, виявленні небезпечних патернів керування та формуванні індивідуальних траєкторій навчання. Вона дає змогу структурувати роботу інструктора, скоротити час заповнення звітних таблиць, забезпечити єдину шкалу оцінювання та створити відтворюваний доказовий протокол для кожного проходу.

У такому вигляді експертна система є завершальним фрагментом наукового результату дисертації, оскільки переводить розроблені моделі ІСНЗ із рівня математичного та програмного обґрунтування до рівня практично застосовного інструмента верифікації, навчання, діагностики та управління ергатичними системами навігаційного забезпечення у складних ситуаціях.

6.8. Висновки до розділу 6

У розділі 6 виконано експериментальну верифікацію моделей, методів і алгоритмів управління інформаційною системою навігаційного забезпечення, розроблених у попередніх розділах дисертації. Експериментальна перевірка була побудована як послідовний доказовий контур: від формування багатоджерельної бази даних до аналізу траєкторій, оцінювання ECDIS-відхилень, ідентифікації операторських і психофізіологічних ознак, сценарного моделювання інтегрального ризику та експертної валідації LOG-проходів. Така структура дала змогу перевірити не окремі програмні фрагменти, а цілісну логіку функціонування ІСНЗ як інформаційного ергатичного контуру [301].

Сформована експериментальна база охопила тренажерне середовище Navi-Trainer Professional 5000, AIS/ECDIS-дані, RADAR/ARPA, GPS, LOG-файли, операторські дії, програмно-аналітичні модулі, МАІКС та інструменти

сценарно-імітаційного моделювання. Це забезпечило можливість зіставлення параметрів руху судна, стану оператора, навігаційного контексту та керувальних реакцій в одному експериментальному полі. У такій постановці людський фактор був розглянутий не як зовнішнє пояснення небезпеки, а як внутрішній функціональний компонент ІСНЗ, що проявляється через вимірювані або розрахункові ознаки.

Експериментальна перевірка фрактально-епізодного аналізу AIS/ECDIS-траєкторій підтвердила можливість кількісного оцінювання мікроваріативності траєкторії руху судна. Обробка масиву з 8686 проходів дала змогу сформувати індекси chaos_score і confidence_index, виконати їх статистичну перевірку за рівнями навігаційного ризику та підтвердити робастність результатів на підмножині $\Phi_{k\geq 3}$. Отримані результати засвідчили, що chaos_score може використовуватися як проксі-індикатор локальної нерегулярності траєкторії за умови подальшого зіставлення з режимом керування, навігаційною ситуацією та експертною інтерпретацією.

Експертне оцінювання ECDIS-відхилень забезпечило другий рівень верифікації – зіставлення фактичної траєкторії з експертно-заданим профілем руху судна. Було формалізовано систему просторових, курсових, швидкісних і статистичних параметрів, що дало змогу оцінити якість проходу, локалізувати проблемні ділянки та сформувати матеріал для тренажерного або інструкторського аналізу. Відхилення від експертно-заданого профілю використовувалися як підстава для професійного розбору з урахуванням навігаційного контексту.

У межах операторсько-часової верифікації було перевірено можливість ідентифікації просторово-часових патернів уваги оператора, переходів між функціональними каналами сприйняття та змін темпу операторського циклу. Використання каналів ECDIS, RADAR/ARPA, AIS, VHF, візуального спостереження й органів керування дало змогу розглядати увагу як обмежений ресурс, що перерозподіляється залежно від складності ситуації. Аналіз часових рядів, переходів між *p*-рівнями, нейромережевого прогнозування та

ознак дисторсії суб’єктивного часу підтвердив можливість раннього виявлення відхилень від індивідуально стабільного шаблону дій оператора.

Багатоканальна ідентифікація непрямих ознак функціонального стану оператора підтвердила доцільність поєднання траєкторних, часових, поведінкових, фізіологічних, термографічних і контекстних даних. ЧСС, добові профілі активності і сну, пульсові тренди, термографічні зміни, постуральні ознаки та мікрореакції були використані як допоміжні інженерно-операторські індикатори. Принциповим результатом є те, що ці ознаки набували доказового значення лише за умови синхронізації з траєкторією, фазою маневру, журналами ECDIS, відеофіксацією та експертною оцінкою. Додатково було показано можливість картографічної візуалізації інтегрального стану оператора за допомогою кольорово-радіусних маркерів, прив’язаних до маршруту судна.

Сценарно-імітаційне моделювання інтегрального показника $I_{HF \to R}$ засвідчило його здатність розрізняти сформовані сценарні режими впливу людського фактора на ризик функціонування ІСНЗ. Для шести сценаріїв із послідовним ускладненням умов було встановлено монотонне зростання середніх значень показника, зміщення квантильних меж у бік критичних значень, перехід системи від напруженого до критичного режиму та узгоджену зміну параметрів динамічної стійкості μ_{st}, L_{eff}, Ω і $R_{dynamic}$. Аналіз чутливості засвідчив, що найбільший внесок у формування інтегрального показника мають саме ті компоненти, які були теоретично покладені в основу моделі: епізодичний, когнітивно-часовий, динаміко-стабілізаційний і керувально-ризиковий.

Завершальним етапом стала експертна система валідації LOG-проходів, яка об’єднала результати попередніх підрозділів у єдину верифікаційну матрицю. На основі понад 300 тренажерних траєкторій було відібрано 78 LOG-проходів з ознаками прояву людського фактора. Система поєднала інтелектуальний прогноз, траєкторні та керувальні метрики, часові профілі, епізодну розмітку, експертну корекцію та фінальний статус проходу. Показовий приклад проходу 1.2.csv підтвердив необхідність поєднання автоматичного аналізу з інструкторською валідацією.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації розв’язано актуальну наукову проблему, що полягає у створенні науково-методологічних засад управління ергатичними системами навігаційного забезпечення, у яких людський фактор розглядається не як зовнішнє випадкове збурення, а як внутрішній функціональний компонент контуру керування. Підтверджено робочу гіпотезу дослідження та доведено, що інтеграція когнітивних, часових, поведінкових і психофізіологічних характеристик оператора в контур ІСНЗ є науково-методологічною основою для побудови адаптивних, інтелектуальних і ризик-орієнтованих систем навігаційного забезпечення. Теоретичне значення роботи полягає у переході від фрагментарного розгляду технічних, інформаційних та операторських чинників до цілісної ергатичної концепції управління рухом судна, а практичне – у створенні моделей, методів і програмно-аналітичних засобів, придатних для використання в системах підтримки прийняття рішень, тренажерній підготовці та ризик-орієнтованому управлінні безпекою мореплавства.

Відповідно до ДЗ 1.1 розроблено концептуально-структурну модель інформаційного поля оператора в ергатичних системах навігаційного забезпечення і управління рухом судна. У межах цього результату інформаційне поле, оператор, навігаційні дані, технічні засоби, зовнішнє середовище, режими керування та контур оцінювання результатів подано як взаємопов’язані елементи єдиної функціональної структури. Наукова новизна полягає у переході від описового уявлення про судноводіння до формалізованого подання ергатичного контуру, у якому людський фактор набуває статусу внутрішнього системного параметра.

Відповідно до ДЗ 1.2 обґрунтовано методологічні принципи стійкості, керованої динаміки, формалізації та уніфікації навігаційних даних ІСНЗ, а також інтеграції когнітивних і психофізіологічних станів оператора в контур управління ергатичною системою. Розроблено аналого-індикаторну модель стійкості та керованої динаміки ІСНЗ на основі гравітаційно-інерціальної інтерпретації, яка дає змогу описати запас стійкості, функціональний резерв, зовнішні і внутрішні збурення, умови переходу до напруженого або критичного режиму та потребу в

корекції режимів керування. Цей результат сформував методологічний фундамент для подальшого переходу до траєкторного, операторського та ризик-орієнтованого рівнів дослідження.

Відповідно до ДЗ 2.1 розроблено процедуру автоматизованого зчитування, нормалізації та метричного подання різноформатних AIS/ECDIS-траєкторій для побудови єдиного простору ознак рейсу. Запропонована процедура забезпечує уніфікацію часових міток, координат, курсу, швидкості, ROT, XTE та інших параметрів руху судна, що створює відтворювану інформаційну основу для подальшого фрактального, статистичного і експертного аналізу. Практичне значення цього результату полягає в усуненні несумісності джерел навігаційних даних і створенні формалізованого входу для інтелектуальної обробки ІСНЗ-траєкторій.

Відповідно до ДЗ 2.2 сформовано фрактально-епізодний апарат аналізу мікрорухів судна, який включає систему локальних і глобальних показників, методи виявлення епізодів підвищеної мікроваріативності, фрактальне кодування, оцінювання епізодної складності та побудову інтегральних індикаторів траєкторної мікроваріативності керування. Наукова новизна полягає у переході від аналізу траєкторії як цілісного геометричного об’єкта до багаторівневого подання її локальної структури через ковзні вікна, мікроепізоди, фрактальні сигнатури та індекси chaos_score і confidence_index. При цьому траєкторні індикатори не ототожнюються з прямою психологічною діагностикою оператора, а розглядаються як непрямі ознаки, що потребують зіставлення з режимом керування, навігаційним контекстом, зовнішніми умовами та експертною розміткою.

У сукупності результати ДЗ 1.1, ДЗ 1.2, ДЗ 2.1 і ДЗ 2.2 забезпечили формалізацію ергатичного контуру ІСНЗ та перехід від первинних навігаційних даних до інтерпретованого простору траєкторних ознак. Саме це створило зв’язок між методологічною моделлю інформаційного поля оператора, аналого-індикаторною моделлю стійкості, нормалізованими AIS/ECDIS-даними та фрактально-епізодною оцінкою мікроваріативності керування судном.

Відповідно до ДЗ 3.1 розроблено моделі ідентифікації розподілу уваги, дисторсії суб'єктивного часу, ментально-мотиваційних і антиципаційних станів оператора. У межах цього напряму увага розглядається як обмежений ресурс, що розподіляється між функціонально значущими каналами інформаційного поля; дисторсією суб'єктивного часу – як непрямий індикатор порушення темпу операторського циклу; ментально-мотиваційними станами – як структуровані рівні сприйняття навігаційної ситуації; антиципацією – як механізм попереднього формування очікуваних дій у складних умовах управління рухом судна.

Відповідно до ДЗ 3.2 розроблено методи непрямої ідентифікації функціонального виснаження, поведінкових стратегій, критичних ситуацій, а також прогнозування дій оператора в ергатичних системах управління рухом судна. Когнітивні, часові, функціональні та поведінкові стани оператора розглянуто як латентні змінні, що оцінюються через сукупність спостережуваних і розрахункових ознак: часові затримки, повторні звернення до навігаційних засобів, зміна послідовності дій, параметри траєкторії, функціональне виснаження та контекст навігаційної ситуації. Практичне значення полягає у створенні основи для раннього виявлення ризикових операторських станів.

У сукупності результати ДЗ 3.1 і ДЗ 3.2 забезпечили формалізацію станів оператора в контурі ІСНЗ. Доведено, що увага, часові деформації, антиципація, ментально-мотиваційні стани, втома та критична дезорганізація можуть бути представлені як взаємопов'язані операторські змінні, що впливають на якість сприйняття навігаційної ситуації, вибір дій, темп реагування та стійкість ергатичного контуру керування.

Відповідно до ДЗ 4.1 розроблено моделі та критерії оцінювання ризиків людського фактора на основі аналізу станів оператора, сприйняття навігаційної ситуації, часових кодів дій і нестійкості керування. Ризик людського фактора переведено з площини описового післяаварійного аналізу в площину формалізованого оцінювання через траєкторні, часові, когнітивні, поведінкові та контекстні індикатори. Це дало змогу пов'язати рівень ризику з інформаційним полем оператора, структурою сприйняття ситуації, режимом керування та параметрами навігаційного середовища.

Відповідно до ДЗ 4.2 розроблено процедури адаптивного управління ризиками людського фактора, включаючи психодіагностичний супровід, підтримку прийняття рішень і тренінгове формування взаємодії «капітан–лоцман». Науково-практичне значення цього результату полягає у переході від аналітичного виявлення ризикових ознак до формування рекомендацій, корекції режимів керування, посилення контролю, тренінгової профілактики та підтримки безпечного функціонування ергатичної системи. Замість поняття автоматичного втручання обґрунтовано підхід до ризик-орієнтованої підтримки керування, що зберігає провідну роль оператора та вахтової команди.

У сукупності результати ДЗ 4.1 і ДЗ 4.2 забезпечили розв’язання задачі оцінювання та управління ризиками людського фактора в ІСНЗ. Наукова новизна полягає в тому, що ризик людського фактора розглянуто як керований об’єкт ергатичної системи, для якого визначаються ознаки стану, рівень ризику, сценарій розвитку ситуації, правило корекції режиму керування та форма підтримувального, коригувального або тренінгового впливу.

Відповідно до ДЗ 5.1 створено програмно-аналітичний контур інтеграції результатів оцінювання траєкторної мікроваріативності, операторських станів і навігаційного ризику в ІСНЗ. У межах цього результату поєднано засоби підтримки багатоцільового та аварійного маневрування, елементи МАІКС, просторово-часову діагностику діяльності оператора, формування коригувальних рекомендацій та експертну валідацію LOG-проходів. Призначення цього контуру полягає не в заміні оператора, а у створенні додаткового аналітичного й рекомендаційного шару для підвищення обґрунтованості рішень у складних навігаційних ситуаціях.

Відповідно до ДЗ 5.2 проведено експериментально-прикладну перевірку працездатності, ефективності та практичної придатності розроблених моделей і засобів на AIS/ECDIS-даних, у тренажерних і прикладних сценаріях управління рухом судна. У розділі 6 реалізовано багаторівневий контур верифікації: нормалізацію та фрактально-епізодний аналіз AIS/ECDIS-проходів; статистичну перевірку chaos_score і confidence_index; експертне оцінювання ECDIS-відхилень; ідентифікацію просторово-часових патернів уваги; аналіз непрямих ознак

функціонального стану; сценарно-імітаційне моделювання інтегрального показника $I_{HF \to R}$ методом Monte Carlo; експертну LOG-валідацію проходів. Це підтвердило працездатність наскрізної логіки дисертації: від ІСНЗ-даних до ознак, ризику, рекомендацій і експертно підтвердженого статусу проходу.

Теоретичне значення дисертаційного дослідження полягає у створенні цілісної науково-методологічної концепції, у межах якої інформаційне поле оператора, аналого-індикаторна модель стійкості ІСНЗ, нормалізовані AIS/ECDIS-дані, фрактально-епізодні індикатори мікроваріативності, когнітивні та психофізіологічні стани оператора, ризики людського фактора і процедури корекції режимів керування розглядаються як взаємопов'язані складові єдиного ергатичного контуру управління рухом судна.

Практична цінність дисертаційного дослідження полягає у створенні відтворюваних моделей, методів і засобів, придатних для використання у системах навігаційного забезпечення, тренажерній підготовці, експертному аналізі LOG-проходів, оцінюванні траєкторної мікроваріативності, діагностиці ризикових операторських станів, формуванні коригувальних рекомендацій та підтримці прийняття рішень у складних навігаційних ситуаціях. Розроблені результати можуть бути використані в програмно-аналітичних модулях ІСНЗ, системах професійної підготовки морських фахівців, засобах ризик-орієнтованого управління безпекою мореплавства в подальших дослідженнях в сфері інтелектуалізації управління рухом судна.

Робочу гіпотезу дисертації підтверджено, поставлену мету досягнуто, а сформульовану наукову проблему розв'язано. Доведено, що підвищення безпеки мореплавства в сучасних умовах має ґрунтуватися на інтеграції технічних засобів навігаційного забезпечення, інтелектуальної обробки AIS/ECDIS-даних, моделей стану оператора, оцінювання ризиків людського фактора, корекції режимів керування та експертної верифікації результатів у межах єдиної ергатичної системи навігаційного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Broberg, O. Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. 2007. Vol. 17, No. 4. P. 353–366. DOI: 10.1002/hfm.20081.

2. International Organization for Standardization. *ISO/TR 16982:2002. Ergonomics of human-system interaction – Usability methods supporting human-centred design*. Geneva: ISO, 2002. 44 p.

3. Vicente, K. J. Human factors engineering that makes a difference: Leveraging a science of societal change. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2008. Vol. 9, No. 1. P. 1–24. DOI: 10.1080/14639220600723484.

4. Grech, M. R., Lützhöft, M. Challenges and opportunities in user centric shipping: Developing a human centred design approach for navigation systems. In: *Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI '16)*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2016. P. 96–104. DOI: 10.1145/3010915.3010920.

5. Bruno, K., Lützhöft, M. Virtually being there: Human aspects of shore-based ship assistance. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2010. Vol. 9, No. 1. P. 81–92. DOI: 10.1007/BF03195167.

6. Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., Langard, B. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*. 2013. Vol. 59. P. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

7. Hanzu-Pazara, R., Barsan, E., Arsenie, P., Chiotoroiu, L., Raicu, G. Reducing of maritime accidents caused by human factors using simulators in training process. *Journal of Maritime Research*. 2008. Vol. 5, No. 1. P. 3–18.

8. International Maritime Organization. Application of the Strategic Plan of the Organization: Resolution A.1197(34), adopted on 3 December 2025, agenda item 8(a). IMO Assembly, 34th session. A 34/Res.1197. London: IMO, 2025. 42 p. URL: https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/assembly-34th-session.aspx

9. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2025. 64 p. URL: https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5562-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2025.html

10. Weintrit, A. Development of the IMO e-Navigation Concept – Common Maritime Data Structure. In: Mikulski, J. (ed.). *Modern Transport Telematics. TST 2011. Communications in Computer and Information Science*. 2011. Vol. 239. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 151–163. DOI: 10.1007/978-3-642-24660-9_18.

11. Fan, S., Shi, K., Weng, J., Yang, Z. Letting losses be lessons: Human-machine cooperation in maritime transport. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 253. Article 110547. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110547.

12. Man, Y., Brorsson, E., Björndal, P. Human–Machine Interaction Challenges for Bridge Operations in Large Passenger Ships and Future Improvements from the Deck Officers' Perspective. *Human Factors in Transportation*. 2023. Vol. 95. P. 730–739. DOI: 10.54941/ahfe1003858.

13. Kari, R., Steinert, M. Human Factor Issues in Remote Ship Operations: Lesson Learned by Studying Different Domains. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 4. Article 385. DOI: 10.3390/jmse9040385.

14. Veitch, E., Alsos, O. A. Human-Centered Explainable Artificial Intelligence for Marine Autonomous Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 11. Article 1227. DOI: 10.3390/jmse9111227.

15. Martelli, M., Virdis, A., Gotta, A., Cassarà, P., Di Summa, M. An Outlook on the Future Marine Traffic Management System for Autonomous Ships. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 157316–157328. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130741.

16. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., van Gelder, P. Safety and efficiency of human-MASS interactions: Towards an integrated framework. *Journal of Marine Engineering and Technology*. 2024. Vol. 24, No. 3. P. 159–178. DOI: 10.1080/20464177.2024.2414959.

17. Wu, X., Liu, K., Zhang, J., Yuan, Z., Liu, J., Yu, Q. An Optimized Collision Avoidance Decision-Making System for Autonomous Ships under Human–Machine Cooperation Situations. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. Vol. 2021. Article 7537825. DOI: 10.1155/2021/7537825.

18. Huang, Y., Chen, L., Negenborn, R. R., van Gelder, P. H. A. J. M. A ship collision avoidance system for human-machine cooperation during collision avoidance. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 217. Article 107913. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107913.

19. Fan, S., Yang, Z. Analysing Seafarer Competencies in a Dynamic Human-Machine System. *Ocean & Coastal Management*. 2023. Vol. 240. Article 106662. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106662.

20. Smith, J., Yazdanpanah, F., Thistle, R., Musharraf, M., Veitch, B. Capturing Expert Knowledge to Inform Decision Support Technology for Marine Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 9. Article 689. DOI: 10.3390/jmse8090689.

21. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Volianska, Y. Development the Method of Shipboard Operations Risk Assessment Quality Evaluation Based on Experts Review. In: Zaporozhets, A. (ed.). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. Cham: Springer. P. 695–710. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_40.

22. Palma, Valentino & Giglio, Davide & Tei, Alessio. (2022). Investigating the introduction of e-navigation and S-100 into bridge related operations: the impact over seafarers. WMU Journal of Maritime Affairs. 22. 37-58. https://doi.org/10.1007/s13437-022-00286-y.

23. Hu, S., Chen, Z., Cai, C., Zhang, J. Risk Prediction of Marine Traffic Based on Fractal Interpolation Algorithm. In: *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2009)*. Hong Kong, China, 8–11 December 2009. P. 2504–2508. DOI: 10.1109/IEEM.2009.5373345.

24. Li, J., Liu, H., Chen, X., Li, J., Xiang, J. Vessel Pattern Recognition Using Trajectory Shape Feature. In: *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence (CSAI 2021)*. New York: ACM, 2021. P. 84–90. DOI: 10.1145/3507548.3507561.

25. Pfoser, D., Jensen, C. S., Theodoridis, Y. Novel Approaches to the Indexing of Moving Object Trajectories. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2000)*. Cairo, Egypt, 10–14 September 2000. P. 395–406.

26. Wang, J., Zhou, Y., Cao, X., Wang, Y., Zhu, C., Zhang, W. Shape-Based Analysis for Vessel Trajectories. In: *Proceedings of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL '17)*. New York: ACM, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1145/3139958.3140060.

27. Turna, İ., Öztürk, O. B. A Causative Analysis on ECDIS-Related Grounding Accidents. *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 15. No 8. P. 792–803. DOI: 10.1080/17445302.2019.1682919.

28. 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: https://doi.org/10.3390/futuretransp6030117.

29. Guo S., Bolbot V., Valdez Banda O. An Adaptive Trajectory Compression and Feature Preservation Method for Maritime Traffic Analysis. Ocean Engineering. 2024. Vol. 312, Part 2. Article 119189. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119189.

30. Huang, J., Chen, B., Li, Y., Sun, W. Fractal Geometry of Wavelet Decomposition in Mechanical Signature Analysis. *Measurement*. 2021. Vol. 173. Article 108571. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108571.

31. Melnyk, O., Volianska, Y., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Kononova, O., Vasalatii, N. Development of Computer-based Remote Technologies and Course Control Systems for Autonomous Surface Ships. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2022. Vol. 22, No. 9. P. 183–188. DOI: 10.22937/IJCSNS.2022.22.9.27.

32. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., Kalinichenko, Y., Rossomakha, O., Naleva, G., Rossomakha, O. Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in Their Steering Process Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 553–559. DOI: 10.12716/1001.16.03.18.

33. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyanskyy, S., Bondar, A., Cheredarchuk, N. Application of Fuzzy Controllers in Automatic Ship

Motion Control Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 3948–3957. DOI: 10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957.

34. Korban, D., Melnyk, O., Onishchenko, O., Kurdiuk, S., Shevchenko, V., Obniavko, T. Radar-Based Detection and Recognition Methodology of Autonomous Surface Vehicles in Challenging Marine Environment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024. Vol. 122. P. 111–127. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.122.7.

35. Wang, S., Li, Y., Xing, H. A Novel Method for Ship Trajectory Prediction in Complex Scenarios Based on Spatio-Temporal Features Extraction of AIS Data. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114846. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114846.

36. Huang, F., Liu, Z., Li, X., Mou, F., Li, P., Fan, Z. Vessel Trajectory Prediction Based on AIS Data: Dual-Path Spatial–Temporal Attention Network with Multi-Attribute Information. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 11. Article 2031. DOI: 10.3390/jmse12112031.

37. Zaman, U., Khan, J., Lee, E., Balobaid, A. S., Aburasain, R. Y., Kim, K. Deep Learning Innovations in South Korean Maritime Navigation: Enhancing Vessel Trajectories Prediction with AIS Data. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 10. Article e0310385. DOI: 10.1371/journal.pone.0310385.

38. Lee, D., Jang, D., Yoo, S. Development of a Multidimensional Analysis and Integrated Visualization Method for Maritime Traffic Behaviors Using DBSCAN-Based Dynamic Clustering. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 2. Article 529. DOI: 10.3390/app15020529.

39. Zhang, C., Liu, S., Guo, M., Liu, Y. A Novel Ship Trajectory Clustering Analysis and Anomaly Detection Method Based on AIS Data. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 288, Part 2. Article 116082. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116082.

40. Wu, W., Yan, D., Yan, J., Wang, X. Ship Behavior Prediction and Anomaly Detection Using LSTM-DCross Model Based on AIS and Remote Sensing Data. *International Journal of Digital Earth*. 2025. Vol. 18, No. 1. Article 2515251. DOI: 10.1080/17538947.2025.2515251.

41. Zhang, D., Chu, X., Liu, C., He, Z., Zhang, P., Wu, W. A Review on Motion Prediction for Intelligent Ship Navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 1. Article 107. DOI: 10.3390/jmse12010107.

42. Jin, W., Zhang, X., Tang, H. STGDPM: Vessel Trajectory Prediction with Spatio-Temporal Graph Diffusion Probabilistic Model. In: *Database Systems for Advanced Applications. DASFAA 2025. Lecture Notes in Computer Science*. Singapore: Springer, 2026. Vol. 15987. P. 571–586. DOI: 10.1007/978-981-95-3830-0_43.

43. Zhang, Q.; Ye, B.; Zhou, Y.; Qin, J.; Duan, J. Data-Scarce Vessel Trajectory Prediction for Maritime Situational Awareness and Collision Risk Assessment: A Knowledge Distillation and Transfer Learning Approach. J. Mar. Sci. Eng. 2026, 14, 981. https://doi.org/10.3390/jmse14110981.

44. Acerbo, E., Bellotti, M. I., Bonetto, F. J. Determining Mammalian Cells State by Fractal Micromotion. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 5. Article e26352. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26352.

45. Li, Y., Zhang, S., Liang, L., Wu, J. Optimized Dispersion Higuchi Fractal Dimension and Its Refined Composite Multi-Scale Version for Signal Analysis. *Applied Acoustics*. 2024. Vol. 224. Article 110161. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110161.

46. Chen, X., Zhao, Y. Research on Spatial Distribution of Ship Encounters Based on Optimized Feature Extraction Algorithm and Integrated AIS Data. *IET Conference Proceedings*. 2024. Iss. 35. P. 46-51. DOI: 10.1049/icp.2025.0355.

47. Zhou, C., Li, J., Zhao, J., Latt, M. K. K., Lu, T. Research on High-Risk Ship Identification and Collision Risk Control Strategies Based on AIS Data. *IET Conference Proceedings*. 2024. Iss. 35. P. 413–419. DOI: 10.1049/icp.2025.0600.

48. Zhao, W., Cheng, X., Wang, D., Xiong, X., Zhang, X. Enhancing Underwater Target Detection: Fusion of Spatio-Temporal Incompletely-Aligned AIS and Sonar Information via DTW and Multi-Head Attention Mechanism. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2024. Vol. 18, No. 12. P. 2521–2540. DOI: 10.1049/rsn2.12653.

49. Papi, F., Tarchi, D., Vespe, M., Oliveri, F., Borghese, F., Aulicino, G., Vollero, A. Radiolocation and Tracking of Automatic Identification System Signals for Maritime Situational Awareness. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2015. Vol. 9, No. 5. P. 568–580. DOI: 10.1049/iet-rsn.2014.0292.

50. Melnyk, O., Burmaka, I., Zaporozhets, A., Onishchenko, O., Burlachenko, D., Nykytuik, P. In-Depth Analysis of Strategies and Techniques of Navigational Safety Improvement and Ship Collision Risk Reduction. In: Melnyk, O., Onishchenko, O., Zaporozhets, A. (eds). *Maritime Systems, Transport and Logistics I. Studies in Systems, Decision and Control*. Cham: Springer, 2025. Vol. 580. P. 65–87. DOI: 10.1007/978-3-031-82027-4_5.

51. Song, J., Shoji, R., Tamaru, H., Kayano, J. Modeling Human Encounter Situation Awareness Results Using Support Vector Machine Models. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 13. Article 7521. DOI: 10.3390/app13137521.

52. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., van Gelder, P. Integrating Situation-Aware Knowledge Maps and Dynamic Window Approach for Safe Path Planning by Maritime Autonomous Surface Ships. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 311. Article 118882. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118882.

53. Makransky, G., Klingenberg, S. Virtual Reality Enhances Safety Training in the Maritime Industry: An Organizational Training Experiment with a Non-WEIRD Sample. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2022. Vol. 38, No. 4. P. 1127–1140. DOI: 10.1111/jcal.12670.

54. Zhou, X. Y., Liu, Z. J., Wu, Z. L., Wang, F. W. Quantitative Processing of Situation Awareness for Autonomous Ships Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 25–31. DOI: 10.12716/1001.13.01.01.

55. Benz, T. M. *Multi-modal User Interfaces in Teleoperation*. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2019. 193 p. DOI: 10.18154/RWTH-2019-03285.

56. Psarros, G. A. Bayesian Perspective on the Deck Officer's Situation Awareness to Navigation Accidents. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. P. 2341–2348. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.381.

57. Ronca, V.; Uflaz, E.; Turan, O.; Bantan, H.; MacKinnon, S.N.; Lommi, A.; Pozzi, S.; Kurt, R.E.; Arslan, O.; Kurt, Y.B.; et al. Neurophysiological Assessment of An Innovative Maritime Safety System in Terms of Ship Operators' Mental Workload,

Stress, and Attention in the Full Mission Bridge Simulator. Brain Sci. 2023, 13, 1319. https://doi.org/10.3390/brainsci13091319.

58. Kim, D.-Y., Jo, D.-W., Yi, M.-R., Park, G.-K. Intelligent Navigation Safety Information System based on Information-Fusion Technology. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*. 2010. Vol. 20, No. 2. P. 226–233. DOI: 10.5391/JKIIS.2010.20.2.226.

59. Gartenberg, D., Breslow, L., McCurry, J. M., Trafton, J. G. Situation Awareness Recovery. *Human Factors*. 2014. Vol. 56, No. 4. P. 710–727. DOI: 10.1177/0018720813506223.

60. Yuen, Kum Fai & Bai, Xiwen & Wang, Xueqin. (2020). Safety behaviour at sea: Policy implications for managing seafarers through positive psychology. Marine Policy. 121. 104163. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104163.

61. Xi, Y. T., Yang, Z. L., Fang, Q. G., Chen, W. J., Wang, J. A New Hybrid Approach to Human Error Probability Quantification: Applications in Maritime Operations. *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 138. P. 45–54. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018.

62. Akyuz, E. Quantitative Human Error Assessment during Abandon Ship Procedures in Maritime Transportation. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 120. P. 21–29. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.017.

63. Szlapczynski, R., Krata, P. Determining and Visualizing Safe Motion Parameters of a Ship Navigating in Severe Weather Conditions. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 158. P. 263–274. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.092.

64. Bye, R. J., Aalberg, A. L. Maritime Navigation Accidents and Risk Indicators: An Exploratory Statistical Analysis Using AIS Data and Accident Reports. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 176. P. 174–186. DOI: 10.1016/j.ress.2018.03.033.

65. American Bureau of Shipping. *Guidance Notes on Safety Culture and Leading Indicators of Safety*. Houston, TX: American Bureau of Shipping, January 2012.

66. Lee, P., Theotokatos, G., Boulougouris, E., Bolbot, V. Risk-informed collision avoidance system design for maritime autonomous surface ships. Ocean Engineering. 2023. Vol. 279. Article 113750. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113750.

67. Ventikos, N. P., Papanikolaou, A. D., Louzis, K., Koimtzoglou, A. Statistical Analysis and Critical Review of Navigational Accidents in Adverse Weather Conditions. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 163. P. 502–517. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.001.

68. Панін, В. В., Доронін, В. В., Спіян, О. М. Побудова нейромережевої експертної системи обробки навігаційних даних в умовах річкової е-навігації. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2019. № 1(48). С. 203–217. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-19.

69. Berweger, B., Born, S., Dietrich, J. Expectancy-Value Appraisals and Achievement Emotions in an Online Learning Environment: Within- and Between-Person Relationships. *Learning and Instruction*. 2022. Vol. 77. Article 101546. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2021.101546.

70. Galieriková, A. The Human Factor and Maritime Safety. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 1319–1326. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.183.

71. Aalberg, A. L., Bye, R. J., Ellevseth, P. R. Risk Factors and Navigation Accidents: A Historical Analysis Comparing Accident-Free and Accident-Prone Vessels Using Indicators from AIS Data and Vessel Databases. *Maritime Transport Research*. 2022. Vol. 3. Article 100062. DOI: 10.1016/j.martra.2022.100062.

72. Mišković, D.; Wang, H. Exploring the Impact of the Maritime Regulatory Framework on the Barrier System in Ship Operations. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 1361. https://doi.org/10.3390/jmse13071361.

73. Hancock, P. A., Weaver, J. L. On Time Distortion under Stress. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2005. Vol. 6, No. 2. P. 193–211. DOI: 10.1080/14639220512331325747.

74. von Schéele, F., Haftor, D. M., Pashkevich, N. Cognitive Time Distortion as a Hidden Condition of Worker Productivity. *Journal of Business Research*. 2019. Vol. 101. P. 591–596. DOI: 10.1016/j.jbusres.2018.11.002.

75. Ogden, R. S., Henderson, J., McGlone, F., Richter, M. Time Distortion under Threat: Sympathetic Arousal Predicts Time Distortion Only in the Context of Negative, Highly Arousing Stimuli. *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14, No. 5. Article e0216704. DOI: 10.1371/journal.pone.0216704.

76. Droit-Volet, S., El-Azhari, A., Haddar, S., Drago, R., Gil, S. Similar Time Distortions under the Effect of Emotion for Durations of Several Minutes and a Few Seconds. *Acta Psychologica*. 2020. Vol. 210. Article 103170. DOI: 10.1016/j.actpsy.2020.103170.

77. Huesmann, Kim & Loffing, Florian. (2024). Perception-action coupling in anticipation research: a classification and its application to racket sports. Frontiers in Psychology. 15. 1-10. 10.3389/fpsyg.2024.1396873.

78. Kasianov, V. A. *Subjective Entropy of Preferences. Subjective Analysis: Monograph*. Warsaw: Institute of Aviation Scientific Publications, 2013. 644 p.

79. Li, W., Zhong, L., Xu, Y., Shi, G. Collision Risk Index Calculation Based on an Improved Ship Domain Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, No. 12. Article 2016. DOI: 10.3390/jmse10122016.

80. Hoem, Å. S., Fjørtoft, K., Rødseth, Ø. J. Addressing the Accidental Risks of Maritime Transportation: Could Autonomous Shipping Technology Improve the Statistics? *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 487–494. DOI: 10.12716/1001.13.03.01.

81. Man, Y., Lundh, M., Porathe, T., MacKinnon, S. From Desk to Field – Human Factor Issues in Remote Monitoring and Controlling of Autonomous Unmanned Vessels. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. P. 2674–2681. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.635.

82. Zhang, X., Chen, W., Xi, Y., Hu, S., Tang, L. Dynamics Simulation of the Risk Coupling Effect between Maritime Pilotage Human Factors under the HFACS Framework. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 2. Article 144. DOI: 10.3390/jmse8020144.

83. Wróbel, K., Gil, M., Chae, C.-J. On the Influence of Human Factors on Safety of Remotely-Controlled Merchant Vessels. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 3. Article 1145. DOI: 10.3390/app11031145.

84. Wang, X., Zhang, B., Zhao, X., Wang, L., Tong, R. Exploring the Underlying Causes of Chinese Eastern Star, Korean Sewol, and Thai Phoenix Ferry Accidents by Employing the HFACS-MA. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No. 11. Article 4114. DOI: 10.3390/ijerph17114114.

85. Hasanspahić, N., Vujičić, S., Frančić, V., Čampara, L. The Role of the Human Factor in Marine Accidents. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 3. Article 261. DOI: 10.3390/jmse9030261.

86. Pietrzykowski, Z., Wielgosz, M., Breitsprecher, M. Navigators' Behavior Analysis Using Data Mining. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 1. Article 50. DOI: 10.3390/jmse8010050.

87. Lin, W.-C., Cheng, H.-H. Enhancing Marine Administrative Management Based on Human Factor through Safety Criteria. *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. Vol. 29, No. 3. P. 268–279. DOI: 10.51400/2709-6998.1432

88. Progoulakis, I., Rohmeyer, P., Nikitakos, N. Cyber Physical Systems Security for Maritime Assets. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 12. Article 1384. DOI: 10.3390/jmse9121384.

89. Zhuravlova, L. P., Lytvynchuk, A. I., Grechukha, I. A., Bedny, I. S. Subclinical Personal Correlates of Psychological Safety. *Insight: The Psychological Dimensions of Society*. 2023. No. 9. P. 94–111. DOI: 10.32999/KSU2663-970X/2023-9-6.

90. Acevedo, R. A., Aponte, E., Harmath, P., Mora Mora, J. Rational Irrationality: A Two Stage Decision Making Model. *Advances in Decision Sciences*. 2021. Vol. 25, No. 1. P. 1–39. DOI: 10.47654/v25y2021i1p1-39.

91. Pleskacz, K., Uriasz, J. Understanding of Navigational Information Systems. *Annual of Navigation*. 2012. Vol. 19, Part 1. P. 121–132. DOI: 10.2478/v10367-012-0010-z.

92. Liu, W., Tian, S., Hong, Z., Ying, Y. Interface Design in the Ship Navigation Information System. In: *2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*. 2010. Vol. 1. P. 395–400. DOI: 10.1109/CAIDCD.2010.5681326.

93. Wang, C., Zhang, J., Yu, H., Wang, D., Yang, X., Wang, Q., Li, F. Experimental Study of Optimized Interface Displays of Navigation Information System. In: Long, S., Dhillon, B. S. (eds). *Proceedings of the 15th International Conference on Man–Machine–Environment System Engineering (MMESE 2015). Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2015. Vol. 356. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 373–379. DOI: 10.1007/978-3-662-48224-7_45.

94. Zúñiga-Galindo, W.A.; Zambrano-Luna, B.A. Hierarchical Wilson–Cowan Models and Connection Matrices. Entropy 2023, 25, 949. https://doi.org/10.3390/e25060949.

95. Szafran-Dobrowolska, J., Grubman-Nowak, M., Renke, M., Jeżewska, M. The Psychosocial Burden and Stress Coping Strategies among Seafarers. *International Maritime Health*. 2023. Vol. 74, No. 2. P. 122–128. DOI: 10.5603/IMH.2023.0018.

96. Shevchenko, R., Cherniavskyi, V., Zinchenko, S., Palchynska, M., Bondarevich, S., Nosov, P., Popovych, I. Research of Psychophysiological Characteristics of Response to Stress Situations by Future Sailors. *Revista Inclusiones*. 2020. Vol. 7, Número Especial. P. 566–579.

97. International Maritime Organization. Seafarers' Training, Certification and Watchkeeping (STCW) Code: Manila Amendments. Attachment 2 to the Final Act of the Conference of Parties to the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978. Document STCW/CONF.2/34. London: IMO, 2010. 346 p.

98. Keller, M. D., Ziriax, J. M., Barns, W., Sheffield, B., Brungart, D., Thomas, T., Jaeger, B., Yankaskas, K. Performance in Noise: Impact of Reduced Speech Intelligibility on Sailor Performance in a Navy Command and Control Environment. *Hearing Research*. 2017. Vol. 349. P. 55–66. DOI: 10.1016/j.heares.2016.10.007.

99. Jones, C. B., Dorrian, J., Rajaratnam, S. M. W., Dawson, D. Working Hours Regulations and Fatigue in Transportation: A Comparative Analysis. *Safety Science*. 2005. Vol. 43, No. 4. P. 225–252. DOI: 10.1016/j.ssci.2005.06.001.

100. Bal, E., Arslan, O., Tavacioglu, L. Prioritization of the Causal Factors of Fatigue in Seafarers and Measurement of Fatigue with the Application of the Lactate Test. *Safety Science*. 2015. Vol. 72. P. 46–54. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.08.003.

101. Ma, M and Liao, R (2025) Factors affecting seafarers' fatigue: a scoping review. Front. Public Health 13:1647685. doi: https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1647685.

102. de Blasiis, K., Mauvieux, B., Elsworth-Edelsten, C., Pezé, T., Jouffroy, R., Hurdiel, R. Photoperiod Impact on a Sailor's Sleep-Wake Rhythm and Core Body Temperature in Polar Environment. *Wilderness & Environmental Medicine*. 2019. Vol. 30, No. 4. P. 343–350. DOI: 10.1016/j.wem.2019.06.001.

103. Xi, Yongtao & Wang, Zhijie & Hu, Shenping & Han, Bing & Yin, Jingbo. (2025). The effect of safety culture on the safety behavior of ship deck officers- empirical evidence from shipping industry. Frontiers in Marine Science. 12. https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1599455.

104. Hu, X., Lodewijks, G. Detecting Fatigue in Car Drivers and Aircraft Pilots by Using Non-Invasive Measures: The Value of Differentiation of Sleepiness and Mental Fatigue. *Journal of Safety Research*. 2020. Vol. 72. P. 173–187. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.12.015.

105. Chang, Y.-H., Yang, H.-H., Hsu, W.-J. Effects of Work Shifts on Fatigue Levels of Air Traffic Controllers. *Journal of Air Transport Management*. 2019. Vol. 76. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.01.013.

106. Perera, L. P. Deep Learning Toward Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2020. Vol. 142, No. 3. Article 031102. DOI: 10.1115/1.4045372.

107. Bakdi, A., Glad, I. K., Vanem, E., Engelhardtsen, Ø. AIS-Based Multiple Vessel Collision and Grounding Risk Identification Based on Adaptive Safety Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 1. Article 5. DOI: 10.3390/jmse8010005.

108. Shen, H., Guo, C., Li, T., Yu, Y. An Intelligent Collision Avoidance and Navigation Approach of Unmanned Surface Vessel Considering Navigation Experience and Rules (переклад назви англійською). *Journal of Harbin Engineering University*. 2018. Vol. 39, No. 6. P. 998–1005. DOI: 10.11990/jheu.201711024.

109. Sun, Z.; Fan, Y.; Wang, G. An Intelligent Algorithm for USVs Collision Avoidance Based on Deep Reinforcement Learning Approach with Navigation Characteristics. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 812. https://doi.org/10.3390/jmse11040812.

110. Vagushchenko, L. L., Vagushchenko, A. A. Enhancement of Support for Collision Avoidance Decisions. *Shipping & Navigation*. 2018. Vol. 27. P. 24–34. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.24-34.

111. Mao, R., Li, G., Hildre, H. P., Zhang, H. Analysis and Evaluation of Eye Behavior for Marine Operation Training–A Pilot Study. *Journal of Eye Movement Research*. 2019. Vol. 12, No. 3. P. 1–14. DOI: 10.16910/jemr.12.3.6.

112. Stroeve, S.; Kirwan, B.; Turan, O.; Kurt, R.E.; van Doorn, B.; Save, L.; Jonk, P.; Navas de Maya, B.; Kilner, A.; Verhoeven, R.; et al. SHIELD Human Factors Taxonomy and Database for Learning from Aviation and Maritime Safety Occurrences. Safety 2023, 9, 14. https://doi.org/10.3390/safety9010014.

113. Biočić, T., Hasanspahić, N., Kristić, M., Đurđević-Tomaš, I. Estimating the Human Error Probability during Lifeboat Drills. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 14. Article 6221. DOI: 10.3390/app14146221.

114. Chervinskyi, M., Obeng, F., Adumene, S., Brown, R. Risk Assessment of Dynamic Positioning Operations: Modelling the Contribution of Human Factors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14, No. 5. Article 462. DOI: 10.3390/jmse14050462.

115. Miller, T.; Durlik, I.; Biczak, P. Adaptive Human Oversight for Maritime Agentic AI Systems: Balancing Operator Workload and Safety Through Risk-Aware Governance. Appl. Sci. 2026, 16, 6903. https://doi.org/10.3390/app16146903.

116. Lee, J., Chung, H. A New Methodology for Accident Analysis with Human and System Interaction Based on FRAM: Case Studies in Maritime Domain. *Safety Science*. 2018. Vol. 109. P. 57–66. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.011.

117. Chen, P., Huang, Y., Mou, J., van Gelder, P. H. A. J. M. Ship Collision Candidate Detection Method: A Velocity Obstacle Approach. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 170. P. 186–198. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.023.

118. Liu, Y., Frangopol, D. M. Probabilistic Risk, Sustainability, and Utility Associated with Ship Grounding Hazard. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 154. P. 311–321. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.101.

119. Bole, A. G., Wall, A. D., Norris, A. Navigation Techniques Using Radar and ARPA. In: *Radar and ARPA Manual: Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. P. 371–405. DOI: 10.1016/B978-0-08-097752-2.00008-8.

120. Tsou, M.-C. Multi-Target Collision Avoidance Route Planning under an ECDIS Framework. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 121. P. 268–278. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.040.

121. Kasianov, V. A. Subjective Risk for Subject and Rating Preferences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 4, No. 4(70). P. 36–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26291.

122. Wróbel, K., Gil, M., Krata, P., Olszewski, K., Montewka, J. On the Use of Leading Safety Indicators in Maritime and Their Feasibility for Maritime Autonomous Surface Ships. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2023. Vol. 237, No. 2. P. 314–331. DOI: 10.1177/1748006X211027689.

123. Håvold, J. I. Safety Culture and Safety Management aboard Tankers. *Reliability Engineering & System Safety*. 2010. Vol. 95, No. 5. P. 511–519. DOI: 10.1016/j.ress.2010.01.002.

124. Arslan, O., Er, I. D. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2007. Vol. 1, No. 3. P. 345–349.

125. Carotenuto, A., Fasanaro, A. M., Molino, I., Sibilio, F., Saturnino, A., Traini, E., Amenta, F. The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for Assessing Stress of Seafarers on Board Merchant Ships. *International Maritime Health*. 2013. Vol. 64, No. 4. P. 215–220. DOI: 10.5603/IMH.2013.0007.

126. Lee, H.-C., Seong, P.-H. A Computational Model for Evaluating the Effects of Attention, Memory, and Mental Models on Situation Assessment of Nuclear Power Plant Operators. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94, No. 11. P. 1796–1805. DOI: 10.1016/j.ress.2009.05.012.

127. 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: https://doi.org/10.33815/2313-4763.2026.1.32.034-057.

128. Ćorović, B., Djurović, P. Marine accidents researched through human factor prisma. *Promet – Traffic & Transportation*. 2013. Vol. 25, No. 4. P. 369–377. DOI: 10.7307/ptt.v25i4.1210.

129. Podder, T. K., Sarkar, N. Fault-Tolerant Control of an Autonomous Underwater Vehicle under Thruster Redundancy. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. Vol. 34, No. 1. P. 39–52. DOI: 10.1016/S0921-8890(00)00100-7.

130. Wie, B., Bailey, D., Heiberg, C. *Singularity Robust Steering Logic for Redundant Single-Gimbal Control Moment Gyros*. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2001. Vol. 24, No. 5. P. 865–872. DOI: 10.2514/2.4799.

131. Trégouët, J.-F., Arzelier, D., Peaucelle, D., Pittet, C., Zaccarian, L. *Reaction Wheels Desaturation Using Magnetorquers and Static Input Allocation*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2015. Vol. 23, No. 2. P. 525–539. DOI: 10.1109/TCST.2014.2326037.

132. Xue, L., Yang, B., Wang, X., Cai, G., Shan, B., Chang, H. MIMU Optimal Redundant Structure and Signal Fusion Algorithm Based on a Non-Orthogonal MEMS Inertial Sensor Array. *Micromachines*. 2023. Vol. 14, No. 4. Article 759. DOI: 10.3390/mi14040759.

133. Chiurazzi, M., Alcaide, J. O., Diodato, A., Menciassi, A., Ciuti, G. Spherical Wrist Manipulator Local Planner for Redundant Tasks in Collaborative Environments. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. Article 677. DOI: 10.3390/s23020677.

134. Wang, L., Liu, Y., Shu, B. Optimization of Redundant Degree of Freedom in Robotic Milling Considering Chatter Stability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. No. 11–12. P. 8379–8394. DOI: 10.1007/s00170-022-09889-4.

135. Gao, W., Tang, Q., Yao, J., Yang, Y. Automatic Motion Planning for Complex Welding Problems by Considering Angular Redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 62. Article 101862. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101862.

136. Juszkiewicz, W., Żukowska, A. *The Use of the K-Sim Polaris Simulator in the Process of Automatic Assessment of Navigator Competence in the Aspect of Anticollision Activities*. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 2. Article 915. DOI: 10.3390/app13020915

137. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. Pivot Point Position Determination and Its Use for Manoeuvring a Vessel. *Ships and Offshore Structures*. 2023. Vol. 18, No. 3. P. 358–364. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.

138. Ma, X., Shen, J., Liu, Y., Qiao, W. A Methodology to Evaluate the Effectiveness of Intelligent Ship Navigational Information Monitoring System. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 193544–193559. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032543.

139. Du, L., Valdez Banda, O. A., Goerlandt, F., Huang, Y., Kujala, P. A COLREG-Compliant Ship Collision Alert System for Stand-On Vessels. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 218. Article 107866. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107866.

140. Qiao, W., Ma, X., Liu, Y., Lan, H. Resilience Assessment for the Northern Sea Route Based on a Fuzzy Bayesian Network. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 8. Article 3619. DOI: 10.3390/app11083619.

141. Du, L., Goerlandt, F., Kujala, P. Review and Analysis of Methods for Assessing Maritime Waterway Risk Based on Non-Accident Critical Events Detected from AIS Data. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 200. Article 106933. DOI: 10.1016/j.ress.2020.106933.

142. Yu, Q., Teixeira, Â. P., Liu, K., Rong, H., Guedes Soares, C. An Integrated Dynamic Ship Risk Model Based on Bayesian Networks and Evidential Reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 216. Article 107993. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107993.

143. Shen, H., Hashimoto, H., Matsuda, A., Taniguchi, Y., Terada, D., Guo, C. Automatic Collision Avoidance of Multiple Ships Based on Deep Q-Learning. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 86. P. 268–288. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.020.

144. Li, Y., Guo, Z., Yang, J., Fang, H., Hu, Y. Prediction of Ship Collision Risk Based on CART. *IET Intelligent Transport Systems*. 2018. Vol. 12, No. 10. P. 1345–1350. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5281.

145. Park, J., Choi, J., Choi, H.-T. COLREGS-Compliant Path Planning Considering Time-Varying Trajectory Uncertainty of Autonomous Surface Vehicle. *Electronics Letters*. 2019. Vol. 55, No. 4. P. 222–224. DOI: 10.1049/el.2018.6680.

146. Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., Huang, G. B. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to

Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 19, No. 5. P. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.

147. Smeaton, G. P., Coenen, F. P. Developing an Intelligent Marine Navigation System. *Computing & Control Engineering Journal*. 1990. Vol. 1, No. 2. P. 95–103. DOI: 10.1049/cce:19900024.

148. Huang, Y., Chen, L., van Gelder, P. H. A. J. M. Generalized Velocity Obstacle Algorithm for Preventing Ship Collisions at Sea. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 173. P. 142–156. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.053.

149. Johansen, T. A., Cristofaro, A., Perez, T. Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, No. 23. P. 14–21. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.315.

150. Blaich, M., Köhler, S., Reuter, J., Hahn, A. Probabilistic Collision Avoidance for Vessels. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, No. 16. P. 69–74. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.260.

151. Abdelaal, M., Fränzle, M., Hahn, A. Nonlinear Model Predictive Control for Trajectory Tracking and Collision Avoidance of Underactuated Vessels with Disturbances. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 160. P. 168–180. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.026.

152. Zhao, Y., Li, W., Shi, P. A Real-Time Collision Avoidance Learning System for Unmanned Surface Vessels. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 182. P. 255–266. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.12.028.

153. Feng, Y., Chen, Z., Dai, Y., Wang, F., Cai, J., Shen, Z. Multidisciplinary Optimization of an Offshore Aquaculture Vessel Hull Form Based on the Support Vector Regression Surrogate Model. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 166. P. 145–158. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.062.

154. Ma, Y., Bi, H., Hu, M., Zheng, Y., Gan, L. Hard Sail Optimization and Energy Efficiency Enhancement for Sail-Assisted Vessel. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 173. P. 687–699. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.026.

155. Sims, J. T. Redundancy Management Software Services for Seawolf Ship Control System. In: *Proceedings of the 27th International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS '97)*. 1997. P. 390. DOI: 10.1109/FTCS.1997.614114.

156. Jacobellis, G., Gandhi, F., Floros, M. Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds. *Journal of the American Helicopter Society*. 2019. Vol. 64, No. 3. P. 1–15. DOI: 10.4050/JAHS.64.032008.

157. Munim, Z. H., Krabbel, H., Haavardtun, P., Kim, T.-E., Bustgaard, M., Thorvaldsen, H. Scenario Design, Data Measurement, and Analysis Approaches in Maritime Simulator Training: A Systematic Review. In: Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning, Workshops – 13th International Conference (MIS4TEL 2023). *Lecture Notes in Networks and Systems.* 2023. Vol. 769. P. 39–47. DOI: 10.1007/978-3-031-42134-1_4.

158. Acanfora, M.; Altosole, M.; Balsamo, F.; Micoli, L.; Campora, U. Simulation Modeling of a Ship Propulsion System in Waves for Control Purposes. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 36. https://doi.org/10.3390/jmse10010036..

159. Shatto, H. L., Jr. Vessel Wave Heading Control Apparatus. U.S. Patent No. 4,769,773. Issued September 6, 1988.

160. Guo, Z., Hong, M., Zhang, Y., Shi, J., Qian, L., Li, H. Research on Safety Evaluation and Weather Routing Optimization of Ship Based on Roll Dynamics and Improved A* Algorithm. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2024. Vol. 16. Article 100605. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100605.

161. France, W. N., Levadou, M., Treakle, T. W., Paulling, J. R., Michel, R. K., Moore, C. An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and Its Influence on Container Lashing Systems. *Marine Technology*. 2003. Vol. 40, No. 1. P. 1–19. DOI: 10.5957/mt1.2003.40.1.1.

162. Taylan, M. On the Parametric Resonance of Container Ships. *Ocean Engineering*. 2007. Vol. 34, No. 7. P. 1021–1027. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.04.007.

163. Eremenko, A. P., Zhukov, Y. D. Smart Onboard Seafaring Safety Assurance System. *Electrical and Computer Systems*. 2016. No. 22(98). P. 293–300. DOI: 10.15276/eltecs.22.98.2016.48.

164. Zhou, Y., Zhang, L., Jia, S., Dai, Z. Efficient Weather Routing Method in Coastal and Island-Rich Waters Guided by Ship Trajectory Big Data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 9. Article 1801. DOI: 10.3390/jmse13091801.

165. European Maritime Safety Agency. *Safety Analysis of EMCIP Data: Navigation Accidents. Summary Report. V1.0*. Lisbon: EMSA, 2022.

166. Akyuz, E. A Hybrid Accident Analysis Method to Assess Potential Navigational Contingencies: The Case of Ship Grounding. *Safety Science*. 2015. Vol. 79. P. 268–276. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.019.

167. Longo L, Wickens CD, Hancock G and Hancock PA (2022) Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition. Front. Psychol. 13:883321. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.883321.

168. Guo, K., Zhai, T., Purushothama, M. H., Dobre, A., Meah, S., Pashollari, E., Vaish, A., DeWilde, C., Islam, M. N. Contactless Vital Sign Monitoring System for In-Vehicle Driver Monitoring Using a Near-Infrared Time-of-Flight Camera. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 9. Article 4416. DOI: 10.3390/app12094416.

169. Perederyi, V., Borchik, E., Ohnieva, O. Information Technology of Control and Support for Functional Sustainability of Distributed Man-Machine Systems of Critical Application. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds). *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1020. P. 461–477. DOI: 10.1007/978-3-030-26474-1_33.

170. Engler, E.; Baldauf, M.; Banyś, P.; Heymann, F.; Gucma, M.; Sill Torres, F. Situation Assessment–An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 17. https://doi.org/10.3390/jmse8010017.

171. Antoine, J.-P. Group Theory: Mathematical Expression of Symmetry in Physics. Symmetry 2021, 13, 1354. https://doi.org/10.3390/sym13081354.

172. Markauskas, A.; Paulauskas, V. Identifying the Importance of Key Performance Indicators for Enhanced Maritime Decision-Making to Avoid Navigational Accidents. J. Mar. Sci. Eng. 2026, 14, 105. https://doi.org/10.3390/jmse14010105.

173. Suyama, R., Miyauchi, Y., Maki, A. Ship Trajectory Planning Method for Reproducing Human Operation at Ports. Ocean Engineering. 2022. Vol. 266. Article 112763. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112763.

174. Yang, Liu & Yang, Junzhang & Cao, Chengdeng & Li, Mingshuang & Fei, Peng & Liu, Qing. (2025). Multimodal Emotion Recognition for Seafarers: A Framework

Integrating Improved D-S Theory and Calibration: A Case Study of a Real Navigation Experiment. Applied Sciences. 15. 9253. https://doi.org/10.3390/app15179253.

175. Yu, H., Guo, D. Study on Physiological Characteristics of Emotion. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*. Qinhuangdao, China, 2015. P. 1286–1289. DOI: 10.1109/IMCCC.2015.276.

176. Patané, I., Cardinali, L., Salemme, R., Pavani, F., Farnè, A., Brozzoli, C. *Action Planning Modulates Peripersonal Space*. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2019. Vol. 31, No. 8. P. 1141–1154. DOI: 10.1162/jocn_a_01349.

177. Tamm, M., Uusberg, A., Allik, J., Kreegipuu, K. *Emotional Modulation of Attention Affects Time Perception: Evidence from Event-Related Potentials*. *Acta Psychologica*. 2014. Vol. 149. P. 148–156. DOI: 10.1016/j.actpsy.2014.02.008.

178. Brams, S. J., Gehrlein, W. V., Roberts, F. S. (eds). *The Mathematics of Preference, Choice and Order: Essays in Honor of Peter C. Fishburn*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-79128-7.

179. Subbotin, S. A. Methods of Synthesis of Models of Quantitative Dependencies in the Basis of Trees of Regression, Realizing Cluster-Regression Approximation by Precedents. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. No. 3. P. 76–85. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-9.

180. 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.

181. Nosov, P. S., Ben, A. P., Matejchuk, 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.

182. 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.

183. Піпченко, О. Д. *Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач*: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.13. Одеса: НУ «ОМА», 2021. 286 с.

184. 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.

185. 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.

186. Lee, S., Jeon, Y., Kim, W. LLM-Driven Predictive–Adaptive Guidance for Autonomous Surface Vessels Under Environmental Disturbances. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14, No. 2. Article 147. DOI: 10.3390/jmse14020147.

187. Zinchenko, S., Nosov, P., Mateichuk, V., Mamenko, P., Popovych, I., Grosheva, O. Automatic Collision Avoidance System with Multiple Targets, Including Maneuvering Ones. *Bulletin of the University of Karaganda. Technical Physics*. 2019. No. 4 (96). P. 69–79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79.

188. 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.

189. Brčić, D., Žuškin, S., Barić, M. Observations on ECDIS Education and Training. In: *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Marine Navigation*. Gdynia, 2017. DOI: 10.1201/9781315099132-2.

190. Nosov, P. S., Ben, A. P., Safonova, A. F., Palamarchuk, I. V. 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.

191. 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.

192. Lin, B.; Zheng, M.; Han, B.; Chu, X.; Zhang, M.; Zhou, H.; Ding, S.; Wu, H.; Zhang, K. PSO-Based Predictive PID-Backstepping Controller Design for the Course-Keeping of Ships. J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 202. https://doi.org/10.3390/jmse12020202.

193. Melnyk, Oleksiy & Moskaliuk, Olena & Onishchenko, Oleg & Petrov, Igor & Melenchuk, Tatyana. (2025). Study of the Human Factor Influence on Ergonomic Management Systems in Maritime Transport. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90462-2_20.

194. 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.

195. Melnyk, O., Onishchenko, O., Lohinov, O., Ocheretna, V., Onyshchenko, S., Dovidenko, Y. Basic Aspects Ensuring Shipping Safety. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 117. P. 139–149. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.117.10.

196. Zinchenko, S., Ben, A., Nosov, P., Popovych, I., Mateichuk, V., Grosheva, O. The Vessel Movement Optimisation with Excessive Control. *Bulletin of the University of Karaganda. Technical Physics*. 2020. No. 3 (99). P. 86–96. DOI: 10.31489/2020Ph3/86-96.

197. Chernyavskyi, V. V., Nosov, P. S., Koretsky, O. A., Onyshko, D. M., Prokopchuk, Y. O. Approaches to Automation of Processes of Identification of Seafarer's Physiological Parameters. In: *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023): матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Херсон, 2023. С. 56–60.

198. Fu, Xiao & Shi, Jingyi & Qian, Dongjin. (2025). Research and analysis of pilot control effect of ship pilots based on human reliability. Scientific Reports. 15. 10.1038/s41598-025-93154-7.

199. Nosov, P. S., Palamarchuk, I. V., Zinchenko, S. M., Popovych, I. S., Nahrybelnyi, Y. A., Nosova, H. V. Development of Means for Experimental Identification of Navigator Attention in Ergatic Systems of Maritime Transport. *Bulletin of the University of Karaganda. Technical Physics*. 2020. No. 1 (97). P. 58–69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69.

200. Zinchenko, S. M., Mateichuk, V. M., Nosov, P. S., Popovych, I. S., Appazov, E. S. Improving the Accuracy of Automatic Control with Mathematical Meter Model in On-board Controller. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. No. 4. P. 197–207. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-4-19.

201. Car, M., Brčić, D., Žuškin, S., Sviličić, B. The Navigator's Aspect of PNC before and after ECDIS Implementation: Facts and Potential Implications towards Navigation Safety Improvement. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 11. Article 842. DOI: 10.3390/jmse8110842.

202. Ponomaryova, V., Nosov, P. Method of Automated Identification of Qualification Parameters for Marine Operators under Risk Conditions. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. No. 1–2 (26–27). P. 144–165. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.144-165.

203. 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.

204. Weintrit, A. Introduction. In: Weintrit, A. (ed.). *International Recent Issues about ECDIS, e-Navigation and Safety at Sea*. Boca Raton: CRC Press, 2011. pp. 9–12.

205. 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.

206. 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. No. 1 (28). P. 6–21. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.006-021.

207. Brčić, D., Žuškin, S. Towards Paperless Vessels: A Master's Perspective. *Pomorski zbornik*. 2018. Vol. 55, No. 1. P. 183–199. DOI: 10.18048/2018.00.12.

208. Nosov, P., Cherniavskyi, V., Zinchenko, S., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Safonov, M. Identification of Distortion of the Navigator's Time in Model Experiment. *Bulletin of the University of Karaganda. Instrument and Experimental Techniques*. 2020. No. 4 (100). P. 57–70. DOI: 10.31489/2020Ph4/57-70.

209. 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.

210. Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., Car, M. Overreliance on ECDIS Technology: A Challenge for Safe Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 277–287. DOI: 10.12716/1001.15.02.02.

211. 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. In: *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023): матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Херсон, 2023. P. 61–68.

212. Nosov, P., Popovych, I., Zinchenko, S., Cherniavskyi, 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.

213. Ji, Z., Zhang, Y., Yang, J. Research on an Energy Field Model for Navigation Risk Assessment of Maritime Autonomous Surface Ships Incorporating Multi-Ship Interaction Features. *Brodogradnja*. 2026. Vol. 77, No. 3. Article 77312. P. 1–33. DOI: 10.21278/brod77312.

214. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Popovych, I. S. Control Redundancy as a Quantitative Measure of Maneuverability. *Науковий вісник Херсонської державної*

морської академії. 2021. No. 1 (24). P. 29–37. DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.029-037.

215. Бень, А. П., Пономарьова, В. П., Носов, П. С., Матейчук, В. М. Підхід до автоматизованого керування мотиваційною структурою навігатора за даними ECDIS. In: *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»*. 2022. P. 64–67.

216. Ren, Y., Chen, M., Weng, J., Zhang, S., Xiao, X., Liu, K. Deploying Efficient LLM Agents on Maritime Autonomous Surface Ships: Fine-Tuning, RAG, and Function Calling in a Mid-Size Model. *Information*. 2026. Vol. 17, No. 3. Article 284. DOI: 10.3390/info17030284.

217. Nosov, P. S., Cherniavskyi, 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.

218. Zinchenko, S. M., Tovstokoryi, O. M., Mateichuk, V. M., Nosov, P. S. Математична модель остійності судна на регулярному хвилюванні. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2024. No. 1 (28). P. 41–56. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.041-056.

219. Al-Falouji, G., Baiardi, M., Pianini, D., Tomforde, S. CoMPass: A Roadmap to Collaborative Perception and Autonomy in Maritime Systems. In: *2025 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems Companion (ACSOS-C)*. IEEE, 2025. P. 69–74. DOI: 10.1109/ACSOS-C66519.2025.00030.

220. Plokhikh, V., Popovych, I., Zavatska, N., Losiyevska, O., Zinchenko, S., Nosov, P., Aleksieieva, M. Time Synthesis in Organization of Sensorimotor Action. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 164–188. DOI: 10.18662/brain/12.4/243.

221. 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.

222. Zhang, R., Qin, X., Pan, M., Li, S., Shen, H. Adaptive Temporal Reinforcement Learning for Mapping Complex Maritime Environmental State Spaces in Autonomous Ship Navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 3. Article 514. DOI: 10.3390/jmse13030514.

223. Зінченко, С. М., Товстокорий, О. М., Носов, П. С., Онишко, Д. М., Козачок, Ю. А. Автоматичне налаштування надлишкової структури системи динамічного позиціювання по детермінанту. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. No. 1 (30). P. 16–30. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.016-030.

224. 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. No. 6 (20). P. 8–22. DOI: 10.52058/2786-6025-2023-6(20)-8-22.

225. Liu, J., Cai, J., Li, S., Li, C., Yu, Y. Heading and Path-Following Control of Autonomous Surface Ships Based on Generative Adversarial Imitation Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 9. Article 1623. DOI: 10.3390/jmse13091623.

226. Nosov, P. S., Popovych, I. S., Zinchenko, S. M., Kobets, V. M., Safonova, A. F., Appazov, E. S. 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.

227. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S. Critical Analysis of Simplified Views of Ship Turning Processes. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*. 2025. No. 2 (31). P. 143–155. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.143-155.

228. Marjanović, M., Prpić-Oršić, J., Valčić, M. Waypoint-Sequencing Model Predictive Control for Ship Weather Routing under Forecast Uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14, No. 2. Article 118. DOI: 10.3390/jmse14020118.

229. Ponomaryova, V., Nosov, P. Development of a Navigator Qualification Model for Automated Ship Handling Control Tasks. *Науковий вісник Херсонської державної*

морської академії. 2024. No. 2 (29). P. 6–23. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.006-023.

230. 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, No. 3 (112). P. 27–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239093.

231. Lama-Carballo, F. J., López-López, M. N., Salgado-Don, A., Pérez-Canosa, J. M. A Novel Methodology and Modelling for the Calculation of the Ship's Pivot Point Making Use of a Full-Mission Bridge Simulator. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14, No. 6. Article 539. DOI: 10.3390/jmse14060539.

232. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kobets, V., Abramov, G. Mathematical Support of the Vessel Information and Risk Control Systems. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2805. P. 335–354.

233. Kochubei, P., Nosov, P. Determining the Impact of the Human Operator Factor Using a Navigation Simulator. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. No. 1 (30). P. 158–170. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.158-170.

234. Dong, C., Guo, X., Gong, Y. Research on Coupling Mechanisms of Risk Factors for Collision Accidents Between Merchant Ships and Fishing Vessels Based on the N-K Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 3. Article 466. DOI: 10.3390/jmse13030466.

235. 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.

236. Zinchenko, S., Moiseienko, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I. Automatic Beam Aiming of the Laser Optical Reference System at the Center of Reflector to Improve the Accuracy and Reliability of Dynamic Positioning. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds). *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications*

Technologies. 2021. Vol. 83. Cham: Springer. P. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-030-80472-5_1.

237. Du, Q., Ma, X., Zhang, R., Qiao, W. Analyzing the Causation of Collision Accidents Between Merchant and Fishing Vessels in China's Coastal Waters by Integrating Association Rules and Complex Networks. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 6. Article 1086. DOI: 10.3390/jmse13061086.

238. 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*. 2022. Vol. 77. Cham: Springer. P. 252–265. DOI: 10.1007/978-3-030-82014-5_17.

239. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., et al. A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories // Digital. 2026. Vol. 6, No. 1. Art. 11. DOI: 10.3390/digital6010011.

240. Gou, Z., Hong, M., Li, Y., Zhang, Y., Qian, L., Zhang, Y. Obstacle Avoidance for Autonomous Surface Vehicle Formations Using Dynamic Ship Domain Models. *Journal of Physics: Conference Series*. 2026. Vol. 3178. Article 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/3178/1/012016.

241. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Ben, A., Nosov, P., et. al. Automatic Optimal Control of a Vessel with Redundant Structure of Executive Devices. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds). *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021*. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 77. Cham: Springer. P. 266–281. DOI: 10.1007/978-3-030-82014-5_18.

242. Koretsky, O., Nosov, P. Approaches to Developing a Decision Support System for Maneuvering Considering Navigator Fatigue. In: *Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2024)*. Odesa, 2024. P. 128–132.

243. Song, Y., Zhang, Z., Qiu, T., Guo, S., Tian, Y. DM-Trans: A Distance-Modulated Transformer for Vessel Trajectory Prediction with Data Fusion. *Journal of Big Data*. 2026. Advance online publication. Vol. 13, Article 69. DOI: 10.1186/s40537-026-01399-4.

244. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Mamenko, P., Onyshko, D., Fomin, O., Píštěk, V., Kučera, P. Machine Learning-Based Semantic Analysis of Scientific Publications for Knowledge Extraction in Safety-Critical Domains. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2025. Vol. 7, No. 4. Article 150. DOI: 10.3390/make7040150.

245. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I. Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3403. P. 582–594.

246. Zhang, B., Koue, J., Okimoto, T., Hirayama, K. COLREGs-Compliant Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-Ship Collision Avoidance. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 8. Article 1402. DOI: 10.3390/jmse13081402.

247. Cherniavskyi, V. V., Diahyleva, O. S., Masonkova, M. M., Nosov, P. S. Formal-Logical Approaches to Building Information Model of Navigator in the Form of a Dynamic Trajectory. In: *IV International Maritime Scientific Conference of the Ship Power Plants and Technical Operation Department of Odessa National Maritime University (MPP&O-2022)*. 2022. P. 363–368.

248. Носов, П. С., Волошинов, С. А., Бень, А. П., Новиков, А. В. Моделювання інтелектуальної діяльності особи, що приймає рішення, в умовах позаштатних ситуацій при управлінні судном. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2017. No. 2 (17). P. 238–243.

249. He, H., Rosales, J. V., Van Zwijnsvoorde, T., Lataire, E., Delefortrie, G. COLREGs-compliant model predictive collision avoidance for autonomous ships in restricted environments. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 338. Article 121966. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121966.

250. Zinchenko, S., Kyrychenko, K., Grosheva, O., Nosov, P., Popovych, I., Mamenko, P. Automatic Reset of Kinetic Energy in Case of Inevitable Collision of Ships. In: *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Wrocław, Poland, 2023. P. 496–500. DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275545.

251. Бень, А. П., Носов, П. С., Зінченко, С. М., Попович, І. С. Інтелектуальний аналіз дій судноводіїв в ергатичних системах управління судном. In: MPP&O-2021. P. 473–477.

252. Тихонов, І. В. *Методологічні основи поліергатичного забезпечення навігації та управління рухом водних транспортних засобів (цільова технологія безпеки)*: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.13 – навігація та управління рухом. Київ, 2018. 441 с.

253. Носов, П. С., Крапивко, Г. І., Безкровний, В. О., Дудченко, О. М. Навігаційні інформаційні системи як засіб ідентифікації людського фактору судноводія. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2018. № 2 (19). С. 236–244.

254. Kobets, V., Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Gritsuk, I., Perederyi, V. Automatic Prevention of the Vessel's Parametric Rolling on the Wave. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3668. P. 235–246.

255. Pipchenko, O. D., Burenkov, O., Tsymbal, M., Pernykoza, V. Identification of Weak Links in the ECDIS–Operator System Based on Simulator Training. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 83–88. DOI: 10.12716/1001.15.01.07.

256. Solovey, O., Ben, A., Dudchenko, S., Nosov, P. Development of Control Model for Loading Operations on Heavy Lift Vessels Based on Inverse Algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5, No. 2 (107). P. 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.214856.

257. 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.

258. Gabruk, R., Tsymbal, M. Safety of Navigation During Dynamic Positioning on Mobile Water Transport Objects. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 59–67. DOI: 10.12716/1001.10.01.06.

259. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. Application of the Conditional Optimization Method in the Problem of Vessel Stormy Sailing. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3790. P. 388–398.

260. 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.

261. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Shcherbina, O., Vasalatii, N. Simulation-Based Method for Predicting Changes in the Ship's Seaworthy Condition under Impact of Various Factors. In: *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 653–664. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_37.

262. 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.

263. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Kyrychenko, K., Nosov, P., Popovych, I. Analytical Model of a Ship's Stability on a Regular Wave. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds). *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 219. Cham: Springer. P. 51–68. DOI: 10.1007/978-3-031-70959-3_3.

264. Aylward, K., Weber, R., Lundh, M., MacKinnon, S. N., Dahlman, J. Navigators' Views of a Collision Avoidance Decision Support System for Maritime Navigation. *The Journal of Navigation*. 2022. Vol. 75, No. 5. P. 1035–1048. DOI: 10.1017/S0373463322000510.

265. Yarovenko, V., Shumylo, O., Malaksiano, M., Melnyk, O., Nosov, P., Píštěk, V., Kučera, P. Analytical Evaluation of Hull-Design Parameters Affecting Ship Controllability and Dynamic Behaviour with Integrated Electric-Propulsion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026. Vol. 14, No. 2. Article 122. DOI: 10.3390/jmse14020122.

266. Nosov, P. S., Ben, A. P., Nosova, H. V., Novikov, V. I. Model of Distribution of Attention 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.

267. Hörteborn, A., Ringsberg, J. W. A Method for Risk Analysis of Ship Collisions with Stationary Infrastructure Using AIS Data and a Ship Manoeuvring Simulator. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 235. Article 109396. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109396.

268. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Popovych, I., Nosov, P., Onyshko, D., Kalinichenko, Y. Reconfiguration of Redundant Structures of Ship Actuators Using Zero Motion Method. In: *2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. 2025. P. 948–953. DOI: 10.1109/ACIT65614.2025.11185810.

269. Hrytsuk, I., Nosov, P., Masonkova, M., Dyagileva, O. 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.

270. Dugan, S. A., Skjetne, R., Wróbel, K., Montewka, J., Gil, M., Utne, I. B. Integration Test Procedures for a Collision Avoidance Decision Support System Using STPA. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 375–381. DOI: 10.12716/1001.17.02.14.

271. 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. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2021. No. 1 (24). P. 57–70. DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.057-070.

272. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I. Automatic Adjustment of the Dynamic Positioning System Redundant Structure by Determinant. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4048. P. 68–80.

273. Li, Y., Song, G., Yip, T.-L., Yeo, G.-T. Fuzzy Logic-Based Decision-Making Method for Ultra-Large Ship Berthing Using Pilotage Data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 5. Article 717. DOI: 10.3390/jmse12050717.

274. 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.

275. 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.

276. Shi, K., Fan, S., Weng, J., Yang, Z. Seafarer Competency Analysis: Data-Driven Model in Restricted Waters Using Bayesian Networks. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 311. Article 119001. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119001.

277. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Kyrychenko, K., Nosov, P., Popovych, I. Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3513. P. 130–140.

278. Кочубей, П. О., Носов, П. С. Підходи інтелектуального аналізу фактору судноводія в ергатичних системах управління рухом судна. In: MINTT-2025. 2025. С. 58–64.

279. Huang, I.-L., Lee, M.-C., Chang, L., Huang, J.-C. Development and Application of an Advanced Automatic Identification System (AIS)-Based Ship Trajectory Extraction Framework for Maritime Traffic Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 9. Article 1672. DOI: 10.3390/jmse12091672.

280. Nosov, P., Zinchenko, S., Nahrybelnyi, Y., Onyshko, D., Polishchuk, V. Development and 3D Printing of Vessel Models with Automated Traffic Control Systems. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. No. 1–2 (26–27). P. 70–81. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.070-081.

281. Ponomaryova, V. P., Nosov, P. S., Mamenko, P. P., Medekong, R. A. Development of Smart Glasses for Supporting Mariner Decision-Making with ECDIS Data. In: *MINTT-2024*. 2024. P. 16–18.

282. Pavlo Nosov. Development of an intelligent AIS-data analyzer for project management in maritime safety of port areas // V Міжнародна науково-практична конференція. *Проєктний та логістичний менеджмент: нові знання на базі двох методологій*. ОНМУ. 2025. С. 186–192.

283. Mamenko, P., Zinchenko, S., Nosov, P., Kyrychenko, K., Mateychuk, V. Gradient Method in the Problem of Minimization of Collision Risk. In: *MPP&O-2022*. 2022. P. 310–317.

284. Носов, П. С., Сокол, І. В., Подобєда, В. В. Розробка методів та засобів автоматизації навігаційних розрахунків на борту судна в критичних ситуаціях. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2024. No. 2 (29). P. 122–138. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.122-138.

285. Luo, D., Chen, P., Yang, J., Li, X., Zhao, Y. A New Classification Method for Ship Trajectories Based on AIS Data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 9. Article 1646. DOI: 10.3390/jmse11091646.

286. Zinchenko, S., Mamenko, P., Nosov, P., Mateichuk, V., Kyrychenko, K., Grosheva, O. Use of the Pivot Point Concept for Automatic Control of a Vessel Without Drift Angle. In: *MPP&O-2022*. 2022. P. 317–322.

287. Abreu, D. T. M. P., Maturana, M. C., Droguett, E. L., Martins, M. R. Human Reliability Analysis of Conventional Maritime Pilotage Operations Supported by a Prospective Model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 228. Article 108763. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108763.

288. Lee, J. S., Lee, H. T., Cho, I. S. Maritime Traffic Route Detection Framework Based on Statistical Density Analysis from AIS Data Using a Clustering Algorithm. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 23355–23366. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3157173.

289. Nosov, P. S. Development of an Expert System for Evaluating Vessel Movement Trajectories during Simulator Training of Navigation Cadets. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. 2025. No. 1. P. 106–111.

290. Cherniavskyi, V., Koretsky, O., Nosov, P., Mamenko, P. Approach to Creating the Automated Monitoring System for Navigator Fatigue. In: *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту»*. 2022. P. 22–26.

291. Guan, M., Cao, Y., Cheng, X. Research of AIS Data-Driven Ship Arrival Time at Anchorage Prediction. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, No. 8. P. 12740–12746. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3370605.

292. Бень, А. П., Носов, П. С., Зінченко, С. М., Попович, І. С. Аналіз втоми навігаторів як фактору впливу на ергатичні системи управління судном. In: *MPP&O-2021*. 2021. С. 478–485.

293. 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.

294. Nosov, P.; Melnyk, O.; Malaksiano, M.; Onishchenko, O.; Karpovych, O.; Onyshko, D.; Koryakin, K.; Kucherenko, V. Ship Motion Dynamics from AIS Trajectories Using Fractal Micromovement Representation Framework. Future Transp. 2026, 6, 175. https://doi.org/10.3390/futuretransp6040175.

295. Патент на корисну модель UA № 132741, МПК A61B 5/00. Аналізатор психоемоційного стану судноводія / Носов П. С., Зінченко С. М., Матейчук В. М., Ляшенко В. Г., Бень А. П.; заявник і патентовласник Херсонська державна морська академія; заявл. 20.09.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

296. 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.

297. Vojković, L., Bakota, M., Kuzmanić Skelin, A. Using the Bayes Probability Model to Evaluate the Risk of Accidents Caused by the Electronic Chart Display and Information System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 8. Article 1391. DOI: 10.3390/jmse12081391.

298. 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.

299. Nosov, P. S., Ben, A. P., Kochubei, P. O. Development of a Formal Model for the Intelligent Analysis of Ship's Operator Fatigue. In: *MPP&O-2025*. 2025. P. 334–338.

300. Barić, M., Grbić, L., Peričin, L., Jelić, R. The Role of the ECDIS on the Development of Situational Awareness – a Study on Grounding Accidents. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 219–225. DOI: 10.12716/1001.17.01.24.

301. Носов, П. С. Аналіз підходів до розробки ергатичних систем у транспортній галузі. In: *MINTT-2025*. 2025. С. 72–74.

302. Nosov, P., Nosov, A. Development of a Formal Model of an Adaptive Ergatic Ship Motion Control System. In: *MINTT-2025*. 2025. P. 75–78.

303. 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.

304. Носов, П. С., Дягилева, О. С., Пономарьова, В. П. Навігаційні тренажери як інструмент виявлення кваліфікаційних параметрів судноводіїв в ситуаційному керуванні безпекою судноплавства. In: MINTT-2025. 2025. С. 79–83.

305. Носов, П., Пономарьова, В., Бень, А., Маменко, П. Розробка системи автоматизованого функціонального аналізу траєкторії руху суден. In: *N&SH-2024*. 2024. С. 30–34.

306. Weintrit, A., Stawicki, K. Operational Requirements for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). Risk of Overreliance on ECDIS. *Transport Problems*. 2008. Vol. 3, No. 2. P. 67–74.

307. Nosov, P., Ponomaryova, V., Ben, A., Prokopchuk, Y. Formal Approaches to Developing an Expert System for Evaluating a Navigator's Qualification Based on Ship Trajectory Data. In: *II Міжнародна науково-практична конференція «Транспорт, порт, логістика, безпека: виклики сучасності та перспективи розвитку»*. 2024. С. 107–115.

308. Nosov, P., Ponomaryova, V., Prokopchuk, Y., Barylnik-Kurakov, I. Intelligent Analysis of Navigators' Maneuver Execution Based on Their Qualification Attributes. In: *PSDMI-2024*. 2024. P. 142–146.

309. Cole, S. J., Asyali, E. Role of ECDIS Training on Improving Situational Awareness. In: *Proceedings of the 19th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities (IAMU AGA 19)*. Barcelona, 2018. P. 165–172.

310. 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. In: *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*. 2023. С. 373–377.

311. Wang, Z.; Shao, F.; Zhang, C.; Yu, H.; Chen, S.; Wu, L. Collision Avoidance Pattern with Collective Wisdom: Ship Action Decision-Making Azimuth Map Construction Based on COLREGs. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 2240. https://doi.org/10.3390/jmse13122240.

312. Žuškin, S., Brčić, D., Šabalja, Đ. A Contribution to Improving the Standards of ECDIS Training. *Pomorstvo*. 2013. Vol. 27, No. 1. P. 131–148.

313. 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. In: *Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій*. 2023. С. 186–187.

314. Nosov, P., Ponomaryova, V., Ben, A., Onyshko, D. Intelligent Approaches to Crew Readiness Assessment for Port Operations in Ergatic Ship Systems. In: *1st International Scientific and Practical Conference "Transport, Port, Logistics, Security: Modern-Day Challenges and Development Prospects"*. 2023. P. 73–84.

315. Brčić, D., Žuškin, S., Valčić, S., Rudan, I. ECDIS Transitional Period Completion: Analyses, Observations and Findings. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2019. Vol. 18. P. 359–377. DOI: 10.1007/s13437-019-00173-z.

316. Cheng, T., Utne, I. B., Wu, B., Wu, Q. A Novel System-Theoretic Approach for Human-System Collaboration Safety: Case Studies on Two Degrees of Autonomy for Autonomous Ships. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 237. Article 109388. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109388.

317. Nosov, P. S., Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Mateichuk, V. M., Moiseienko, V. S., Kyrychenko, K. V. Complex Analysis of ECDIS-Data to Increase the Safety of Marine Transport Operation. In: *Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice*. 2021. P. 89–94.

318. Rutkowski, G. ECDIS Limitations, Data Reliability, Alarm Management and Safety Settings Recommended for Passage Planning and Route Monitoring on VLCC Tankers. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12, No. 3. P. 483–490. DOI: 10.12716/1001.12.03.06.

319. Nosov, P. S., Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Mateichuk, V. M., Moiseienko, V. S., Kyrychenko, K. V. Modeling the Behavior of Navigator to Improve Safety of

Maritime Transport Operation. In: *Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice*. 2021. P. 95–100.

320. Nosov, P. S., Zinchenko, S. M., Prokopchuk, Yu. O. Development of an Informational Model of Influence the "Human Factor" to Ergatic Maritime System. In: *Праці II Міжнародного симпозіуму «Інтелектуальні рішення – С: Теорія прийняття рішень»*. 2021. С. 95–96.

321. Car, M., Tominac-Coslovich, S., Brčić, D., Žuškin, S. Cross-Section of ECDIS Education and Training Worldwide and in the Republic of Croatia: Relations Between Programs and User Perceptions. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 267–275. DOI: 10.12716/1001.15.02.01.

322. Носов, П. С., Зінченко, С. М., Нагрибельний, Я. А., Попович, І. С. Формальні підходи щодо ідентифікації зорової уваги судноводіїв під час несення навігаційної вахти. In: MINTT-2020. 2020. С. 37–40.

323. Носов П. С., Сафонова Г. Ф., Бень А. П., Носова Г. В. Метод ідентифікації положення судноводія на капітанському містку під час несення навігаційної вахти. MINTT-2020. 2020. С. 32–36.

324. Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., Car, M. Partial Analysis of ECDIS EHO Research: Port State Control. *Naše More*. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 93–101. DOI: 10.17818/NM/2021/2.5.

325. Носов, П. С., Черненко, В. В. Модель планування ідентифікації психофізіологічних параметрів судноводія під час несення навігаційної вахти. X Всеукраїнська студентська наукова конференція «Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства». 2020. С. 231–235.

326. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Kravchenko, O., Sagaydak, O., Steba, A. Adaptive Risk Management Strategies in Autonomous Maritime Systems. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds). Systems, Decision and Control in Energy VII. *Studies in Systems, Decision and Control.* Vol. 596. Cham: Springer, 2025. P. 247–259. DOI: 10.1007/978-3-031-90462-2_14.

327. Higuchi T. Approach to an Irregular Time Series on the Basis of the Fractal Theory. Physica D: Nonlinear Phenomena. 1988. Vol. 31, No. 2. P. 277–283. DOI: 10.1016/0167-2789(88)90081-4.

328. Katz M. J. Fractals and the Analysis of Waveforms. Computers in Biology and Medicine. 1988. Vol. 18, No. 3. P. 145–156. DOI: 10.1016/0010-4825(88)90041-8.

329. Petrosian A. Kolmogorov Complexity of Finite Sequences and Recognition of Different Preictal EEG Patterns. In: Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, CBMS 1995. Lubbock, TX, USA, 9–10 June 1995. IEEE Computer Society. P. 212–217. DOI: 10.1109/CBMS.1995.465426.

330. Falconer K. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 400 p. DOI: 10.1002/9781119942399.

331. Jolliffe, I. T., Cadima, J. Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Article 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.

332. Kruskal, W. H., Wallis, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association. 1952. Vol. 47, No. 260. P. 583–621. DOI: 10.1080/01621459.1952.10483441.

333. Mann, H. B., Whitney, D. R. On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger than the Other. The Annals of Mathematical Statistics. 1947. Vol. 18, No. 1. P. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

334. Vargha, A., Delaney, H. D. A Critique and Improvement of the CL Common Language Effect Size Statistics of McGraw and Wong. Journal of Educational and Behavioral Statistics. 2000. Vol. 25, No. 2. P. 101–132. DOI: 10.3102/10769986025002101.

335. Spearman, C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. The American Journal of Psychology. 1904. Vol. 15, No. 1. P. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.

336. Bogachenko Y., Pipchenko O.D.: Monitoring and Identification of DP Operators Behavioural Traits and Common Errors During Simulator Training. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 15, No. 2, https://doi.org/10.12716/1001.15.02.09, pp. 337-341, 2021.

337. Shi, K., Weng, J., Fan, S., Blanco-Davis, E., & Yang, Z. (2024). Exploring the influence of seafarers' individual characteristics on the perceived risk in Maritime emergencies: A simulator study. Journal of Transportation Safety & Security, 16(11), 1378–1402. https://doi.org/10.1080/19439962.2024.2332740.

338. Shmelova T., Yatsko M., Sierostanov I. Collaborative Decision Making in Emergency Caused by Captain Incapacitation: Deterministic and Stochastic Modelling. International Journal of Decision Support System Technology. 2023. Vol. 15, No. 1. P. 1–27. https://doi.org/10.4018/IJDSST.320477.

339. Bokau, J. R. K., Park, Y., Kim, D. Data-Driven Simulation of Navigator Stress in Close-Quarter Ship Encounters: Insights for Maritime Risk Assessment and Intelligent Training Design. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 14. Article 7630. DOI: 10.3390/app15147630.

340. Sabat, M., Haładus, B., Klincewicz, M. et al. Cognitive load, fatigue and aversive simulator symptoms but not manipulated zeitgebers affect duration perception in virtual reality. Sci Rep 12, 15689 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-18520-1.

341. Shi, Kun & Weng, Jinxian & Fan, Shiqi & Yang, Zaili & Ding, Haifeng. (2023). Exploring seafarers' emotional responses to emergencies: An empirical study using a shiphandling simulator. Ocean & Coastal Management. 243. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106736.

342. Shmelova, Tetiana & Sikirda, Yuliya & Yatsko, Maxim & Stratonov, Vadym. (2024). Integration of Deterministic, Stochastic, and Non-stochastic Models to Obtain an Optimal Collaborative Decision in the Flight Emergency. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5_17.

343. Li, B., Lu, J., Lu, H., & Li, J. (2023). Predicting maritime accident consequence scenarios for emergency response decisions using optimization-based decision tree approach. Maritime Policy & Management, 50(1), 19–41. https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1959074.

344. Zúñiga-Galindo, W.A., Zambrano-Luna, B.A. & Dibba, B. Hierarchical Neural Networks, p-Adic PDEs, and Applications to Image Processing. J Nonlinear Math Phys 31, 63 (2024). https://doi.org/10.1007/s44198-024-00229-6.

345. Žagar D. Evaluating Emotional Response and Effort in Nautical Simulation Training Using Noninvasive Methods. Sensors. 2025. Vol. 25, No. 17. Article 5508. https://doi.org/10.3390/s25175508.

346. Rainio, Oona & Teuho, J. & Klén, Riku. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. Scientific Reports. 14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x.

347. Yildiz, S.; Tonoğlu, F.; Uğurlu, Ö.; Loughney, S.; Wang, J. Spatial and Statistical Analysis of Operational Conditions Contributing to Marine Accidents in the Singapore Strait. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 2001. https://doi.org/10.3390/jmse10122001.

348. Przybyła-Kasperek, M. Entropy Method for Decision Making with Uncertainty. Entropy 2026, 28, 141. https://doi.org/10.3390/e28020141.

349. Yu, Hongchu & Meng, Qiang & Fang, Zhixiang & Liu, Jingxian & Xu, Lei. (2023). A review of ship collision risk assessment, hotspot detection and path planning for maritime traffic control in restricted waters. Journal of Navigation. 75. 1337-1363. 10.1017/S0373463322000650.

350. Feng, Y.; Huang, D.; Hong, X.; Wang, H.; Loughney, S.; Wang, J. Spatial-Temporal Evolution of Maritime Accident Hot Spots in the East China Sea: A Space-Time Cube Representation. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 233. https://doi.org/10.3390/jmse13020233.

351. Li, Jing. (2024). Area under the ROC Curve has the most consistent evaluation for binary classification. PLOS ONE. 19. 10.1371/journal.pone.0316019.

352. Chen, W., Yang, K., Yu, Z. et al. A survey on imbalanced learning: latest research, applications and future directions. Artif Intell Rev 57, 137 (2024). https://doi.org/10.1007/s10462-024-10759-6.

353. Canuto, Clebeson & Moreno, Plinio & Samatelo, Jorge & Vassallo, Raquel & Santos-Victor, José. (2020). Action Anticipation for Collaborative Environments: The Impact of Contextual Information and Uncertainty-Based Prediction. Neurocomputing. 444. 10.1016/j.neucom.2020.07.135.

354. Yoo, Wonchul & Kim, Tae-wan. (2022). Statistical trajectory-distance metric for nautical route clustering analysis using cross-track distance. Journal of Computational Design and Engineering. 9. 731-754. 10.1093/jcde/qwac024.

355. Petrović, I.; Vujičić, S. Use of Eye-Tracking Technology to Determine Differences Between Perceptual and Actual Navigational Performance. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 247. https://doi.org/10.3390/jmse13020247.

356. Lim, Bryan & Zohren, Stefan. (2021). Time-series forecasting with deep learning: a survey. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. 379. 20200209. 10.1098/rsta.2020.0209.

357. Szlapczynski, Rafal & Szlapczynska, Joanna & Gil, Mateusz & Życzkowski, Marcin & Montewka, Jakub. (2024). Holistic collision avoidance Decision Support System for watchkeeping deck officers. Reliability Engineering & System Safety. 250. 10.1016/j.ress.2024.110232.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ
проректор ХДМА з НПР
д.т.н., професор
_____ Бень А.П.
«24» грудня 2026 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
зі спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом»
Носова Павла Сергійовича

Комісією у складі: Нагрибельного Я.А., Сокол А.О., Онишко Д.М., складено цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича на тему: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення» впроваджені в освітній процес кафедри загальнофахової підготовки та морської безпеки під час підготовки здобувачів освіти за спеціальностями та освітніми програмами, пов'язаними з морською безпекою, ризиками людського фактору судноводія.

В освітньому процесі використано положення щодо функціонування ергатичних систем та безпеки мореплавства, впроваджені алгоритми дій у критичних ситуаціях.

У навчальних матеріалах застосовано концепцію інформаційного поля судноводія, що дозволяє пояснювати його роль відносно вимог безпеки у критичних ситуаціях відносно ситуаційної обізнаності.

Окремо впроваджено матеріали, що пов'язані з людським фактором судноводія: розподілом уваги, часовою дезорганізацією дій, втомою, антиципацією, психофізіологічною напруженістю та ризиком помилки.

Впровадження результатів сприяло оновленню змісту освітніх компонентів: «Безпека життєдіяльності та боротьба за живучість судна», «Кібербезпека суднових комп'ютерних систем та мереж», «Рятувальні засоби», «Боротьба з пожежами», посиленню науково-методичного рівня викладання та формуванню ризик-орієнтованого мислення у здобувачів освіти напряму судноводіння.

Декан факультету
судноводіння, д.п.н, професор _____ Ярослав НАГРИБЕЛЬНИЙ

В.о. завідувача кафедри
загальнофахової підготовки
та морської безпеки, PhD _____ Альона СОКОЛ

Старший викладач кафедри
загальнофахової підготовки
та морської безпеки _____ Дмитро ОНИШКО

ACT

on the use of the results of the dissertation research
of the applicant for the degree of Doctor of Technical Sciences,
in specialty 05.22.13 "Navigation and Traffic Control"
Pavlo Nosov,
on the topic "Scientific and methodological foundations for the management of ergatic navigational support systems" in the educational process
of Vilnius Gediminas Technical University Lithuanian Maritime Academy

We, the undersigned, Vytautas Dubra and Rima Mickienė, have drawn up this Act to certify that the results of the scientific research presented in the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences by Pavlo Nosov on the topic "Scientific and methodological foundations for the management of ergatic navigational support systems" have been implemented in the educational process of the Department of Navigation, namely:

The application of the developed scientific and methodological provisions concerning the management of ergatic navigational support systems considering the human factor, the methodology for analysing navigator actions in a simulator-based training environment, and the approaches to assessing attention distribution, temporal organization of actions, psychophysiological tension, and risky manoeuvring episodes - in the delivery of simulator-based training in the areas of Bridge Team Management, Bridge Resource Management, Operational Use of ECDIS, Radar/ARPA, navigational safety, and ship handling in complex conditions for students and trainees of navigator training programmes.

Head of the Marine Navigation Department,
Chair of the Study Programme Committee
for Marine Navigation assoc. prof. dr. Vytautas DUBRA

Vice Dean for Studies and International Relations Rima MICKIENĖ

KMSTC
SPECIALISED TRAINING CENTRE

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Носова Павла Сергійовича
на здобуття доктора технічних наук
зі спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом»

Актом засвідчується що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича на тему: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення», впроваджені та використовуються у навчально-тренажерній діяльності центру під час підготовки судноводіїв за напрямами, що відповідають змісту IMO Model Course 1.22 "Bridge Resource Management", IMO Model Course 1.27 "Operational Use of Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS)" та окремим елементам IMO Model Course 1.08 "Radar Navigation at Management Level (Radar, ARPA, Bridge Teamwork and Search and Rescue)".

У тренажерному процесі використано підхід до побудови навігаційного сценарію як моделі реальної ергатичної системи судноводіння, у якій взаємодіють судно, судноводій, вахтова команда, ECDIS, AIS, РЛС/ARPA, GNSS, засоби зв'язку, зовнішнє середовище, правила COLREG, процедури містка та часові обмеження. Це дозволяє оцінювати не лише кінцевий результат маневру, а й якість планування, розподіл функцій на містку, повноту ситуаційної обізнаності, своєчасність рішень і ефективність використання навігаційної інформації.

Практично застосовано підходи до післясценарного аналізу тренажерних вправ: аналіз траєкторії руху судна, мікрокорекцій курсу, поперечних відхилень, локальних епізодів нестійкого маневрування, надлишкових коригувальних дій і ділянок підвищеного навігаційного ризику. Це підвищує об'єктивність розбору вправ і дозволяє інструктору аргументовано пояснювати делегатам не лише факт помилки, а й механізм її формування.

Окремо використано матеріали щодо людського фактору. Їх застосування посилює практичну складову занять з BRM/BTM, ECDIS та Radar/ARPA, оскільки

Kherson Maritime Specialised Training Centre
at Kherson State Maritime Academy

Adress: 20 Nezalezhnosti Avenue (formerly Ushakova Avenue)
Kherson, 73000, Ukraine
tel.: +38 050 672 7685
e-mail: office@kmstc.org

kmstc.org

KMSTC
SPECIALISED TRAINING CENTRE

пов'язує технічне використання навігаційних засобів із якістю командної взаємодії й прийняття рішень.

Впровадження результатів сприяло удосконаленню методики тренажерної підготовки, підвищенню якості післясценарного аналізу, формуванню ризик-орієнтованого мислення у делегатів та підсиленню практичної спрямованості підготовки за модельними курсами IMO.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до подальшого використання під час розроблення тренажерних сценаріїв, проведення занять з Bridge Resource Management, ECDIS, Radar/ARPA, аналізу дій вахтової команди та підготовки інструкторських матеріалів.

Керівник тренажерного центру: Дудченко С.В.

Посада: Директор

Підпис:



М.П.

Kherson Maritime Specialised Training Centre
at Kherson State Maritime Academy

Adress: 20 Nezalezhnosti Avenue (formerly Ushakova Avenue)
Kherson, 73000, Ukraine
tel.: +38 050 672 7685
e-mail: office@kmstc.org
07.05.2026

kmstc.org

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Носова Павла Сергійовича
у навчально-тренажерній та методичній діяльності
на здобуття доктора технічних наук
зі спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом»

м. Одеса
«14» 05 2026 р.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича на тему: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення», використовуються у діяльності ТОВ «АНГЛО-ІСТЕРН УКРАЇНА» під час професійної підготовки, тренажерного оцінювання та методичного супроводу судноводіїв відповідно до змісту IMO Model Course 1.39 "Leadership and Teamwork", IMO Model Course 1.22 "Bridge Resource Management" та підходами до оцінювання компетентності моряків, визначеними IMO Model Course 3.12 "Assessment, Examination and Certification of Seafarers".

У діяльності центру використано науково-методичні положення щодо оцінювання дій судноводія не лише за результатом виконання вправи, а й за процесом формування рішення: сприйняттям навігаційної ситуації, вибором джерел інформації, комунікацією у складі вахтової команди, розподілом ролей, часовими затримками, рівнем деталізації оцінки навігаційної обстановки та здатністю своєчасно перейти до безпечного маневру.

Практично застосовано підходи до аналізу даних тренажерного сценарію: траєкторії руху судна, зміни курсу, характеру мікрокорекцій, локальних ознак нестійкого керування та ризику. Це дозволяє підвищити обґрунтованість оцінювання делегатів і перейти від загальної якісної характеристики до більш предметного аналізу професійних дій.

У методичній роботі використано положення щодо людського фактору: розподілу уваги, втоми, інформаційного перевантаження, часової дезорганізації, суб'єктивного спрощення ситуації та ризику помилки. Це має практичне значення для підготовки делегатів до роботи в умовах інтенсивного трафіку, обмеженої видимості, складної комунікації, аварійного оповіщення та швидкої зміни навігаційної обстановки.

Використання результатів сприяло удосконаленню критеріїв оцінювання тренажерних вправ, підвищенню якості інструкторського аналізу, формуванню практичних рекомендацій для делегатів і посиленню уваги до командної взаємодії, лідерства, ситуаційної обізнаності та людського фактору як ключових складових безпечного судноводіння.

Практична значущість впровадження полягає у підвищенні об'єктивності оцінювання компетентності судноводіїв, удосконаленні підготовки до дій у критичних ситуаціях, розвитку навичок самоконтролю та формуванні стійких професійних алгоритмів прийняття рішень відповідно до цілей IMO Model Courses.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до подальшого використання у тренажерній підготовці, оцінюванні професійної компетентності, розробленні сценаріїв підвищеної складності, методичній роботі інструкторів і підготовці судноводіїв до безпечного управління рухом судна.

Керівник / представник центру: Катуна В.В.
Посада: Начальник НТЗ Англо Істерн Україна

Підпис

М.П.

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "АНГЛО-ІСТЕРН УКРАЇНА" Ідент. код 36501489 МІСТО ОДЕСА

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
ЄВРО ГРАСКОР
Організація та проведення судноремонтних робіт
65013, м. Одеса, вул. Локомотивна буд. 38.
Код ЄДРПОУ 40174331
Тел. +380937093999 E-mail: eurograskor@ukr.net

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Носова Павла Сергійовича

м. Чорноморськ «22» квітня 2026 р.

Представниками ТОВ «ЄВРО ГРАСКОР», складено цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича на тему «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення» впроваджені та використовуються у діяльності підприємства під час організації судноремонтних робіт, технічного супроводу та перевірки готовності суднових навігаційних і інформаційних засобів до подальшої експлуатації.

Було використано комплексний підхід, за яким працездатність навігаційного обладнання оцінюється не лише за технічним станом окремого пристрою, а й з урахуванням його взаємодії з іншими елементами суднового інформаційно-керуючого комплексу, стабільності надходження даних та коректності їх відображення оператору. Під час проведення ремонтних і відновлювальних робіт застосовано положення щодо втрати або спотворення окремих навігаційних даних на загальну надійність функціонування системи та безпечність подальшої експлуатації судна. Це дало можливість більш обґрунтовано визначати необхідний обсяг перевірок після ремонту або технічного обслуговування, контролювати інформаційні зв'язки між обладнанням та враховувати його роль у забезпеченні ситуаційної обізнаності оператора.

Використання результатів дисертаційної роботи сприяло вдосконаленню підходів до технічного контролю суднових систем, своєчасному виявленню можливих неузгодженостей у роботі навігаційного обладнання та підвищенню його експлуатаційної надійності.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до подальшого використання під час організації судноремонтних робіт, технічного супроводу, перевірки та підготовки суднових навігаційних і інформаційних систем до експлуатації.

.

З Повагою,
Директор **В.В. Гнатенко**

УКРАЇНА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЄВРО ГРАСКОР» ІДЕНТ. КОД 40174331

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

КАЗЕННЕ ПІДПРИЄМСТВО «МОРСЬКА ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНА СЛУЖБА»

Україна, 65114 м. Одеса,
вул. Люстдорфська дорога, 140 а
Тел.: +380 48 785 07 17
Факс: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

MINISTRY FOR DEVELOPMENT OF COMMUNITIES AND TERRITORIES OF UKRAINE

STATE ENTERPRISE "MARITIME SEARCH AND RESCUE SERVICE"

140 a, Lustdorfska Doroha Str., Odesa
65114, Ukraine
Tel: +380 48 785 07 17
Fax: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження
Носова Павла Сергійовича
на здобуття доктора технічних наук
зі спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом»
на тему: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення»

Результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича впроваджені та використовуються у діяльності підприємства під час удосконалення підходів до аналізу навігаційної інформації, оцінювання розвитку небезпечних ситуацій, врахування людського фактора та підвищення обгрунтованості рішень в умовах обмеженого часу.

У межах зазначеного впровадження було використано моделі і методи щодо формування інформаційного поля оператора, в якому дані про місце та параметри руху судна, навігаційне оточення, інформація від технічних засобів і зовнішніх джерел розглядаються у взаємозв'язку. Це має практичне значення в ситуаціях, коли необхідно швидко оцінити характер і можливий подальший розвиток небезпечної події.

Окремі методи щодо до аналізу AIS/ECDIS-траєкторій, отримали безпосереднє практичне застосування, це дозволило під час розгляду навігаційних подій виділяти ділянки нестійкого маневрування, підвищеної нерегулярності руху, надмірних корекцій курсу та інших ознак ускладнення ситуації. Також було використано методологію щодо впливу дефіциту часу, інформаційного навантаження, затримки реакції та помилкової оцінки обстановки на дії оператора у складних і критичних умовах. Це дозволило повніше враховувати людський фактор під час аналізу причин та розвитку навігаційних подій.

Використання результатів сприяло вдосконаленню підходів до ретроспективного аналізу навігаційних ситуацій, оцінювання дій операторів та формування ризик-орієнтованих рекомендацій щодо безпечної інформаційної взаємодії.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані до подальшого використання під час аналізу аварійних і передаварійних ситуацій, роботи з AIS/ECDIS-даними, оцінювання людського фактора та вдосконалення процедур інформаційного забезпечення морської безпеки.

Член комісії з перетворення – заступник директора
З інженерної інфраструктури КП «МПРС»
Руслан МІКРУХ

Дементій БУРЛАЧЕНКО
+38(048)774-42-15
11.05.2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження

м. _Одеса «2» _лютого_ 2026 р.

Представники ТОВ «БСК БОТС» в особі Літвінчука М.В., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича на тему «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення» впроваджені та використовуються у діяльності підприємства під час технічного супроводу, ремонту, модернізації, оцінювання працездатності та підготовки до випробувань суднових навігаційних, інформаційних і керуючих систем.

Під час виконання зазначених робіт було використано комплексний підхід, за яким оцінюється не тільки справність окремого приладу або системи, а й узгодженість їх роботи з іншими судновими засобами, стабільність інформаційних каналів, коректність передавання та відображення навігаційних даних. Через це, практичне застосування отримали підходи щодо оцінювання впливу технічних відмов, інформаційних затримок, тощо. Такий підхід використовувався під час ремонту та модернізації обладнання для визначення не тільки факту його технічної справності, а й можливого впливу виявлених відхилень на ситуаційну обізнаність оператора, своєчасність прийняття рішення та безпечність керування рухом судна.

Використання результатів дисертаційної роботи сприяло вдосконаленню процедур технічної діагностики, контролю інформаційної сумісності суднових систем та оцінювання їх готовності до подальшої експлуатації після ремонту або модернізації. Зазначені результати рекомендовані до подальшого використання під час технічного супроводу, випробувань і модернізації суднових навігаційних та керуючих систем.

Представник підприємства: Директор

«БСК Ботс» М.П. /Літвінчук М.В./

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

«МАРІН ТЕХ СЕРВІС»

ЄДРПОУ 41738536, адреса: 65091, місто Одеса, вулиця Комітетська, будинок 14, офіс 210 Email: marin.servis.2017@gmail.com Телефон: +380935665375

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття доктора технічних наук зі спеціальності 05.22.13 «Навігація та управління рухом» Носова Павла Сергійовича на тему: «Науково-методологічні основи управління ергатичними системами навігаційного забезпечення»

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «МАРІН ТЕХ СЕРВІС», засвідчуємо, що результати дисертаційної роботи Носова Павла Сергійовича впроваджені та використовуються у діяльності підприємства, пов'язаній із технічним супроводом і аналізом функціонування засобів морського радіозв'язку та систем GMDSS.

У межах впровадження використано положення щодо комплексного оцінювання інформаційної взаємодії в системах аварійного і термінового морського зв'язку, де результат залежить не лише від технічної працездатності обладнання, а й від своєчасності надходження повідомлення, правильності його сприйняття оператором та послідовності подальших дій.

Також впроваджені підходи щодо врахування інформаційного навантаження, дефіциту часу, розподілу уваги та ризику помилки оператора під час роботи з аварійними сигналами і повідомленнями безпеки. Це дозволяє розглядати GMDSS як цілісний інформаційний ланцюг взаємодії між технічними засобами, оператором судна та береговими службами.

Окреме практичне впровадження стосувалось положення щодо аналізу можливих затримок, неповноти або неузгодженості інформації під час аварійного обміну.

Загалом, впровадження результатів дисертаційного дослідження Носова П.С. сприяло вдосконаленню підходів до технічного супроводу GMDSS, аналізу аварійних сценаріїв та оцінювання надійності інформаційного обміну між судном і береговими службами.

Результати дисертаційної роботи застосовано під час технічного супроводу систем GMDSS, аналізу процедур аварійного зв'язку та підвищення надійності інформаційного забезпечення морської безпеки.

28.04.2026 р.

Директор **Олексій БУЛАТОВ**

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IS CERTIFIED IN COMPLIANCE WITH ДСТУ ISO 9001-2015 by *Shipping Register of Ukraine*

ДОДАТОК Б

Реєстраційні картки НДР

Реєстраційна картка НДДКР

Державний реєстраційний номер: 0125U001788

Відкрита

Дата реєстрації: 21-03-2025

Статус виконавця: 17 - головний виконавець

1. Загальні відомості

Підстава для проведення робіт: 43 - власна ініціатива (якщо робота виконується з власної ініціативи за кошти виконавця НДР або безкоштовно)

КПКВК:

Напрям фінансування: 2.2 - прикладні дослідження і розробки

Джерела фінансування

7704 - власні кошти, кошти підприємств, установ, організацій, фізичної особи на виконання ініціативних робіт

Загальний обсяг фінансування (тис. грн.): 2.000

У тому числі по роках (тис. грн.):

Рік	Фінансування
2025	1.000
2026	1.000

2. Замовник

Назва організації: Херсонська державна морська академія

Код ЄДРПОУ/ІПН: 35219930

Адреса: проспект Ушакова, буд. 20, м. Херсон, Херсонська обл., 73000, Україна

Підпорядкованість: Міністерство освіти і науки України

Телефон: 380552495902

E-mail: ksma@ksma.ks.ua

WWW: http://www.kma.ks.ua

3. Виконавець

Назва організації: Херсонська державна морська академія

Код ЄДРПОУ/ІПН: 35219930

Підпорядкованість: Міністерство освіти і науки України

Адреса: проспект Ушакова, буд. 20, м. Херсон, Херсонська обл., 73000, Україна

Телефон: 380552495902

E-mail: ksma@ksma.ks.ua

WWW: http://www.kma.ks.ua

4. Співвиконавець

8. Заключні відомості

Керівник організації:

Гусєв Віктор Миколайович (к.т.н., професор, доцент)

Керівники роботи:

Носов Павло Сергійович (к.т.н., доц.)

Відповідальний за подання документів: Клементьєва Оксана Юріївна (Тел.: +38 (050) 521-32-42)

Керівник відділу реєстрації наукової діяльності УкрІНТЕІ



Юрченко Т.А.

Облікова картка ДіР

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0219U000267

Державний реєстраційний номер: 0117U002176

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 24-01-2019

II. Етап виконання ДіР

Номер етапу: 2

Назва етапу: Розробка методології та моделей контролю за рухом судна. Розробка програмного забезпечення високоточної інтелектуальної системи управління рухом судна військогово та цивільного призначення.

Початок етапу: 01.2018

Закінчення етапу: 12.2018

Вид звітного документа: Остаточний звіт

III. Відомості про виконавця ДіР

Повне найменування юридичної особи (або ПІБ фізичної особи): Херсонська державна морська академія

Код за ЄДРПОУ: 35219930

Місцезнаходження:

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

Розмір організації:

Телефон: (0552) 22-35-69

IV. Відомості про співвиконавців ДіР

Херсонська державна морська академія. - № u 2016 09646; дата под. 19.09.16 р.; опубліковано 27.03.17 Бюл. №6. 4. Pipchenko O. Aspects of maritime resource management training for emergency steering scenarios on azimuth thrusters / O. Pipchenko, V. Shevchenko // ICERS 13, Odessa - 2017. - pp. 16-24. 5. Nosov P.S., Ben A.P., Matejchuk V.N., Safonov M.S. Identification of "Human error" negative manifestation in maritime transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. Zaporizhzhia National Technical University. № 4(47). - 2018. Pages 204-213. 6. Nosov P. S., Palamarchuk I.V., Safonov M.S., Novikov V.I.. Modeling the manifestation of the human factor of the maritime crew // Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) № 5 (77). - 2018. Pages 82-92.

X. Заключні відомості

Керівник юридичної особи Чернявський Василь Васильович

Перелік осіб-виконавців

Бень Андрій Павлович

Волков Євген Леонідович

Вільський Геннадій Борисович

Габрук Ростислав Анатолійович

Гудко Володимир Петрович

Клементьєва Оксана Юріївна

Корнева Алла Олександрівна

Ляшенко Валерій Георгійович

Мальцев Анатолій Сидорович

Носов Павло Сергійович

Паламарчук Ігор Володимирович

Пивоваров Юрій Вікторович

Півоваров Леонід Абрамович

Піпченко Олександр Дмитрович

Радин Володимир Костянтинович

Рудніченко Микола Дмитрович

Товстокорий Олег Миколайович

Цимбал Микола Миколайович

Відповідальний за підготовку облікових документів

Телефон

Реєстратор

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності



Облікова картка ДіР

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0221U101554

Державний реєстраційний номер: 0119U100948

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 22-01-2021

II. Етап виконання ДіР

Номер етапу: 2

Назва етапу: Методика оцінювання якості прийнятого рішення з управління динамічним позиціонуванням судна за критеріями безпечності та економічної ефективності.

Початок етапу: 01.2020

Закінчення етапу: 12.2020

Вид звітного документа: Остаточний звіт

III. Відомості про виконавця ДіР

Повне найменування юридичної особи (або ПІБ фізичної особи): Херсонська державна морська академія

Код за ЄДРПОУ: 35219930

Місцезнаходження: проспект Ушакова, буд. 20, м. Херсон, Херсонська обл., 73000, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

Розмір організації:

Телефон: 380552495902

IV. Відомості про співвиконавців ДіР

X. Заключні відомості

Керівник юридичної особи — Чернявський Василь Васильович, д. пед. н., 13.00.02

Перелік осіб-виконавців

Габрук Ростислав Анатолійович (к.т.н., 05.22.13)

Зінченко Сергій Миколайович

Клементьєва Оксана Юріївна

Мальцев Анатолій Сидорович (д. т. н.)

Носов Павло Сергійович (к.т.н., 05.13.12)

Паламарчук Ігор Володимирович

Петровський Андрій Валерійович (к. т. н.)

Пивоваров Юрій Вікторович

Піпченко Олександр Дмитрович (к. т. н.)

Радін Володимир Костянтинович (к.т.н., 05.08.03)

Федоров Антон Ігорович

Цимбал Микола Миколайович (д. т. н., 05.22.13)

Чернявський Василь Васильович (д.пед.н.)

Відповідальний за підготовку облікових документів — Клементьєва Оксана Юріївна

Телефон — +38 (050) 521-32-42

Реєстратор

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності



Облікова картка ДіР

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0222U001965

Державний реєстраційний номер: 0121U109680

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 08-02-2022

II. Етап виконання ДіР

Номер етапу: 1

Назва етапу: Дослідження патентнокон'юнктурної вітчизняної та зарубіжної наукової бази з побудови автоматизованих систем керування рухом морських суден та визначення базових принципів їх розробки та функціонування.

Початок етапу: 01.2021

Закінчення етапу: 12.2021

Вид звітного документа: Остаточний звіт

III. Відомості про виконавця ДіР

Повне найменування юридичної особи (або ПІБ фізичної особи): Херсонська державна морська академія

Код за ЄДРПОУ: 35219930

Місцезнаходження: проспект Ушакова, буд. 20, м. Херсон, Херсонська обл., 73000, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

Розмір організації:

Телефон: 380552495902

IV. Відомості про співвиконавців ДіР

Мальцев А.С., Сурінов І.Л., Бень А. П. Індикатор відхилення осі бура: пат. 149191 Україна : МПК G08G 3/02 (2006.01). № u 202007925, опубл. 27.10.2021, Бюл.№ 43/2021.

X. Заключні відомості

Керівник юридичної особи Чернявський Василь Васильович
д.пед.н.

Перелік осіб-виконавців

Букетова Наталія Миколаївна

Зінченко Сергій Миколайович
(к.т.н., 05.13.07)

Макарчук Дмитро Володимирович
(к.т.н., 05.22.13)

Мальцев Анатолій Сидорович
(д.т.н., 05.22.16)

Матейчук Вадим Миколайович

Носов Павло Сергійович
(к.т.н., 05.13.23)

Паламарчук Ігор Володимирович
(к.т.н.)

Піпченко Олександр Дмитрович
(д. т. н., 05.22.13)

Радін Володимир Костянтинович
(к.т.н., 05.13.06)

Федоров Антон Ігорович
(к.т.н.)

Чернявський Василь Васильович
(д. пед. н., 13.00.02)

Відповідальний за підготовку облікових документів Клементьєва Оксана Юріївна

Телефон +38 (050) 521-32-42

Реєстратор

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності



Облікова картка ДіР

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0226U002032

Державний реєстраційний номер: 0124U001164

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 05-02-2026

II. Етап виконання ДіР

Номер етапу: 2

Назва етапу: Системи передачі інформації та забезпечення безпеки інфраструктури морських перевезень.

Початок етапу: 01.2025

Закінчення етапу: 12.2025

Вид звітного документа: Проміжний звіт

III. Відомості про виконавця ДіР

Повне найменування юридичної особи: Одеський національний морський університет

Код за ЄДРПОУ: 01127777

Місцезнаходження: вул. Мечникова, буд. 34, м. Одеса, Одеська обл., 65029, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

Розмір організації:

Телефон: 380487321735

IV. Відомості про співвиконавців ДіР

X. Заключні відомості

Керівник юридичної особи Руденко Сергій Васильович
д.т.н., 05.13.22

Перелік осіб-виконавців

Бень Андрій Павлович
(к.т.н., професор, 05.13.06)

Брославець Вячеслав Вікторович

Вороненко Ірина Вікторівна
(д.е.н., с.н.с., 08.00.03)

Гуліда Ірина Михайлівна

Мельник Олексій Миколайович
(д.т.н., професор, 05.22.01)

Носов Павло Сергійович
(к.т.н., доцент, 05.13.23)

Полєтаєв Микола Іванович
(д. ф.-м. н., професор, 01.04.17)

Полікаровських Олексій Ілліч
(д.т.н., професор, 05.12.13)

Пітерська Варвара Михайлівна
(д. т. н., професор, 05.13.22)

РОМАНЮК Вадим Васильович
(д.т.н., професор, 01.05.02)

Якименков Дмитро Олександрович

Відповідальний за підготовку облікових документів Яковлєва Т.І.

Телефон 38097-5318774

Реєстратор Юрченко Тетяна Анатоліївна

Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності



Юрченко Тетяна Анатоліївна

ДОДАТОК В

Довідка про керівництво науково-дослідною лабораторією

ДОВІДКА

Видана Носову Павлу Сергійовичу, кандидату технічних наук, доценту, про те, що відповідно до наказу ректора Херсонської державної морської академії від 27.08.2020 №168 він очолював науково-дослідну лабораторію Херсонської державної морської академії «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом судна» у період з 01.11.2020 р. по 01.07.2025 р.

Науково-дослідна лабораторія «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом судна» функціонувала як науково-організаційна та експериментально-дослідна база для виконання робіт, пов'язаних із розробленням моделей, методів і програмних засобів підтримки прийняття рішень, ергатичних систем, автоматизованих систем керування рухом судна, а також із дослідженням впливу людського фактора на процеси судноводіння.

У період діяльності лабораторії за участю Носова П.С. на її базі здійснювалася науково-дослідна робота за напрямами, пов'язаними з такими науково-дослідними темами, що виконувались у Херсонській державній морський академії:

– «Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден», державний реєстраційний номер 0119U100948, (відповідальний виконавець);

– «Розробка новітніх моделей та програмних засобів для автоматизованих систем керування рухом морських суден цивільного та спеціального призначення», державний реєстраційний номер 0121U109680, (відповідальний виконавець);

– «Розробка методів зниження впливу фактору людини в автоматизованих системах керування судном», державний реєстраційний номер 0125U001788, (відповідальний виконавець).

В лабораторії здійснювалось виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Херсонської державної морської академії на 2021–2025 рр., яке фінансовано за рахунок коштів державного бюджету, № 0121*U*114703 (2021 р., 2023 р., Носов П.С. - відповідальний виконавець щорічних етапів роботи).

На базі зазначеної лабораторії також виконувались теоретичні, методологічні, програмно-аналітичні та експериментальні дослідження з питань інтелектуальної обробки навігаційної інформації, аналізу AIS/ECDIS-даних, оцінювання дій судноводія, формалізації людського фактора в ергатичних системах, побудови систем підтримки прийняття рішень, автоматизованого керування рухом судна та підвищення безпеки судноплавства.

Довідку видано для подання за місцем вимоги.

Проректор з НПР Андрій БЕНЬ

М. П.

«08» 04 2026 р.

ДОДАТОК Г

Патент на корисну модель України

УКРАЇНА

(19) UA (11) 132741 (13) U

(51) МПК (2019.01)
A61B 5/00

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 09479
(22) Дата подання заявки: 20.09.2018
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.03.2019
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.03.2019, Бюл.№ 5

(72) Винахідник(и):
Носов Павло Сергійович (UA),
Зінченко Сергій Миколайович (UA),
Матейчук Вадим Миколайович (UA),
Ляшенко Валерій Георгійович (UA),
Бень Андрій Павлович (UA)

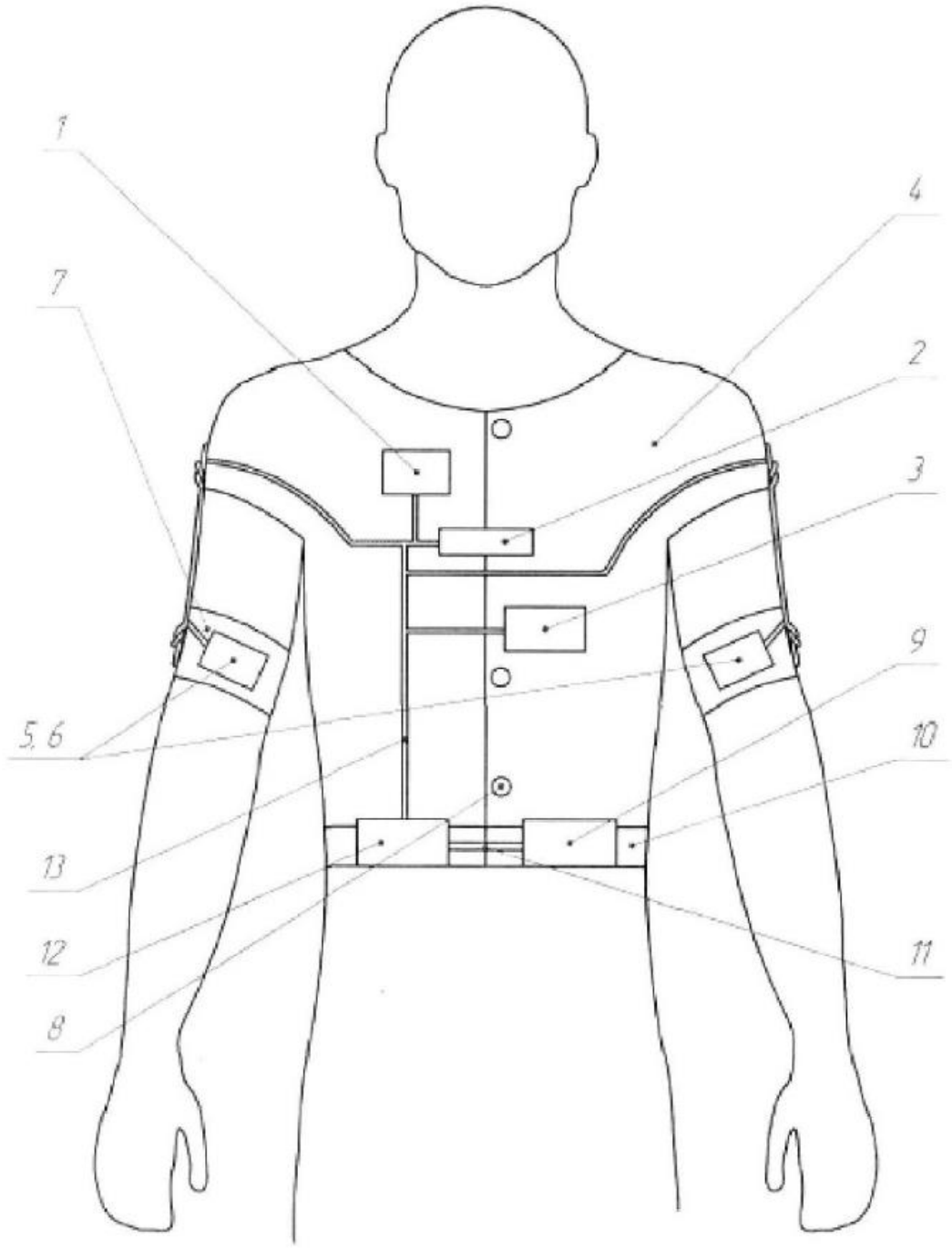
(73) Власник(и):
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ,
пр. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000 (UA)

(54) АНАЛІЗАТОР ПСИХОЕМОЦІЙНОГО СТАНУ СУДНОВОДІЯ

(57) Реферат:

Аналізатор психоемоційного стану оператора містить датчики температури тіла та частоти пульсу, які прилягають до тіла оператора, датчики артеріального тиску, які прилягають до плечових частин рук оператора. Аналізатор виконаний у вигляді жилету із міцної тканини, який розташований на тілі оператора, манжетів, які закріплені на плечових частинах рук оператора, та поясу, на якому розміщені мікрокомпресор, блок управління та блок живлення. Датчики температури тіла та частоти пульсу розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на жилеті, датчики артеріального тиску також розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на манжетах, а також встановлені датчик частоти дихання, що прилягає до тіла людини, корпус якого закріплений вакуумною присоскою у гнізді на жилеті, датчики тремору рук, що прилягають до плечових частин рук оператора, корпуси яких закріплені вакуумними присосками у гніздах манжетів. Корпуси датчиків через канали для відкачування повітря з'єднані з мікрокомпресором для відкачування повітря і вакуумної фіксації корпусів датчиків до жилету та манжетів, датчики температури тіла, частоти пульсу, артеріального тиску, частоти дихання, тремору рук електричними та інформаційними дротами з'єднані з блоком управління для передачі даних і оброблення їх у блоці управління, відповідно до заданого алгоритму, для формування попереджувальної звукової і візуальної сигналізації при виявленні критичних показників психоемоційного стану, передачі оброблених даних на віддалений сервер для отримання управлінських рішень та корегування дій оператора.

UA 132741 U


1
4
7
2
3
9
5, 6
10
13
12
11
8

Корисна модель належить до технічного обладнання для визначення психоемоційного стану по фізіологічним реакціям оператора, зокрема судноводія.

Аналізатор - це система сприймання, передавання й обробки інформації про явища у внутрішньому і зовнішньому середовищах організму.

Відомий аналізатор для використання в системі фізіологічної оцінки, що визначає психоемоційний стан оператора з датчиками частоти пульсу, температури тіла, артеріального тиску, частоти дихання, що встановлені на спеціальному жилеті та прилягають до тіла людини [див. патент США патент США N 4572197, кл. A61B 5/04, 1986].

Недоліки даної системи полягають у тому, що:

- при аналізі психоемоційного стану не враховується тремор кінцівок рук;
- відсутня гнучкість системи (неможливість оперативної зміни положень датчиків на тілі оператора та алгоритму обробки даних);
- відсутній обмін даними з віддаленим сервером для коригування дій оператора відповідно до результатів діагностування.

Найбільш близькою по технічній суті до корисної моделі, що заявляється, є система управління станом оператора [патент RU 2229672 C1], яка попереджує засипання оператора та підвищує надійність його роботи, контролює стан оператора за рахунок використання голосового зв'язку, датчиків частоти пульсу, температури тіла, артеріального тиску та втрати свідомості (найближчий аналог).

Недоліки даної системи управління полягають у тому, що:

- при аналізі психоемоційного стану не враховуються такі важливі параметри як частота дихання та тремор кінцівок рук;
- обмежена мобільність оператора через наявність електричного та інформаційного дротового зв'язку між датчиками, що кріпляться до тіла оператора, і самою системою управління станом оператора;
- відсутня гнучкість системи (неможливість оперативної зміни положень датчиків на тілі оператора та алгоритму обробки даних);
- відсутній обмін даними з віддаленим сервером для коригування дій оператора відповідно до результатів діагностування.

Задачею корисної моделі є:

- отримання більш якісних даних про психоемоційний стан оператора;
- підвищення мобільності системи діагностування;
- підвищення гнучкості системи діагностування;
- організація обміну з віддаленим сервером для отримання управлінських рішень для коригування дій оператора.

Поставлена задача вирішується тим, що аналізатор виконаний у вигляді жилету із міцної тканини, який розташований на тілі оператора, манжетів, які закріплені на плечових частинах рук оператора та поясу, на якому розміщені мікрокомпресор, блок управління та блок живлення, датчики температури тіла та частоти пульсу розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на жилеті, датчики артеріального тиску також розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на манжетах, а також встановлені датчик частоти дихання, що прилягає до тіла людини, корпус якого закріплений вакуумною присоскою у гнізді на жилеті, датчики тремору рук, що прилягають до плечових частин рук оператора, корпуси яких закріплені вакуумними присосками у гніздах манжетів, корпуси датчиків через канали для відкачування повітря з'єднані з мікрокомпресором для відкачування повітря і вакуумної фіксації корпусів датчиків до жилету та манжетів, датчики температури тіла, частоти пульсу, артеріального тиску, частоти дихання, тремору рук електричними та інформаційними дротами з'єднані з блоком управління для передачі даних і оброблення їх у блоці управління, відповідно до заданого алгоритму, для формування попереджувальної звукової і візуальної сигналізації при виявленні критичних показників психоемоційного стану, передачі оброблених даних на віддалений сервер для отримання управлінських рішень та корегування дій оператора.

Розкриваючи причинно-наслідкові зв'язки між сукупністю істотних ознак приладу, який заявляється, і технічним результатом, необхідно відзначити, що:

- ознака формули «...аналізатор виконаний у вигляді жилету із міцної тканини, який розташований на тілі оператора, манжетів, які закріплені на плечових частинах рук оператора та поясу, на якому розміщені мікрокомпресор, блок управління та блок живлення...» дозволяє підвищити мобільність системи діагностування;
- ознака формули «...датчики температури тіла та частоти пульсу розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на жилеті, датчики артеріального тиску також розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у спеціальних гніздах на манжетах,

а також встановлені датчик частоти дихання, що прилягає до тіла людини, корпус якого закріплений вакуумною присоскою у гнізді на жилеті, датчики тремору рук, що прилягають до плечових частин рук оператора, корпуси яких закріплені вакуумними присосками у гніздах манжетів, корпуси датчиків через канали для відкачування повітря з'єднані з мікрокомпресором для відкачування повітря і вакуумної фіксації корпусів датчиків до жилету та манжетів...» дозволяє підвищити гнучкість системи діагностування у частині легкої зміни положення датчиків за рахунок використання вакуумної фіксації;

- ознака формули «...а також встановлені датчик частоти дихання, що прилягає до тіла людини, корпус якого закріплений вакуумною присоскою у гнізді на жилеті, датчики тремору рук, що прилягають до плечових частин рук оператора, корпуси яких закріплені вакуумними присосками у гніздах манжетів...» дозволяє отримати більш якісні дані про психоемоційний стан оператора за рахунок використання додаткових датчиків частоти дихання та тремору рук;

- ознака формули «...датчики температури тіла, частоти пульсу, артеріального тиску, частоти дихання, тремору рук електричними та інформаційними дротами з'єднують з блоком управління для передачі даних і оброблення їх у блоці управління відповідно до заданого алгоритму для формування попереджувальної звукової і візуальної сигналізації при виявленні критичних показників психоемоційного стану, передачі оброблених даних на віддалений сервер для отримання управлінських рішень та корегування дій оператора...» дозволяє отримати більш якісні дані про психоемоційний стан оператора за рахунок використання у блоці управління більш складного математичного апарату для обробки даних, підвищити гнучкість системи діагностування у частині використання програмного забезпечення, організувати обмін з віддаленим сервером для отримання управлінських рішень та коригування дій оператора;

На кресленні зображено аналізатор психоемоційного стану оператора. Аналізатор містить датчик температури тіла 1, датчик частоти дихання 2, датчик частоти пульсу 3, жилет 4, датчик тремору рук 5, датчик артеріального тиску 6, манжети 7, ґудзики 8, блок управління 9, пояс жилету 10, канал для відкачування повітря 11, мікрокомпресор 12, електричні та інформаційні дроти 13. Жилет 4 виконаний із міцної тканини, має ґудзики 8 для його зручного використання. Датчики 1, 2, 3, 5, 6 з'єднанні електричними та інформаційними дротами 13 із блоком управління 9 що розташований на поясі жилету 10. Корпуси датчиків 1, 2, 3, 5, 6 сполучаються через канали для відкачування повітря 11 з мікрокомпресором 12.

Аналізатор працює наступним чином. На тіло людини одягається жилет 4 та застібається ґудзиками 8. Розташування ґудзиків 8 забезпечує достатню надійність функціонування без обмежень у пересуванні при виконанні функцій судноводія. Датчики 1, 2, 3 виставляються на жилеті 4 а датчики 5, 6 на манжеті 7 та прикріплюються до жилету/манжету шляхом відкачування повітря з їх корпусів. Положення манжетів 7 фіксуються пасом до плечових частин рук оператора. При увімкненні блока живлення, дані з датчиків 1, 2, 3, 5, 6 одночасно та безперервно обробляють у блоці управління 9 відповідно до заданого алгоритму та формують попереджувальну звукову і візуальну сигналізацію при виявленні критичних показників психоемоційного стану, через блок управління 9 організують обмін з віддаленим сервером для отримання управлінських рішень та корегування дій оператора.

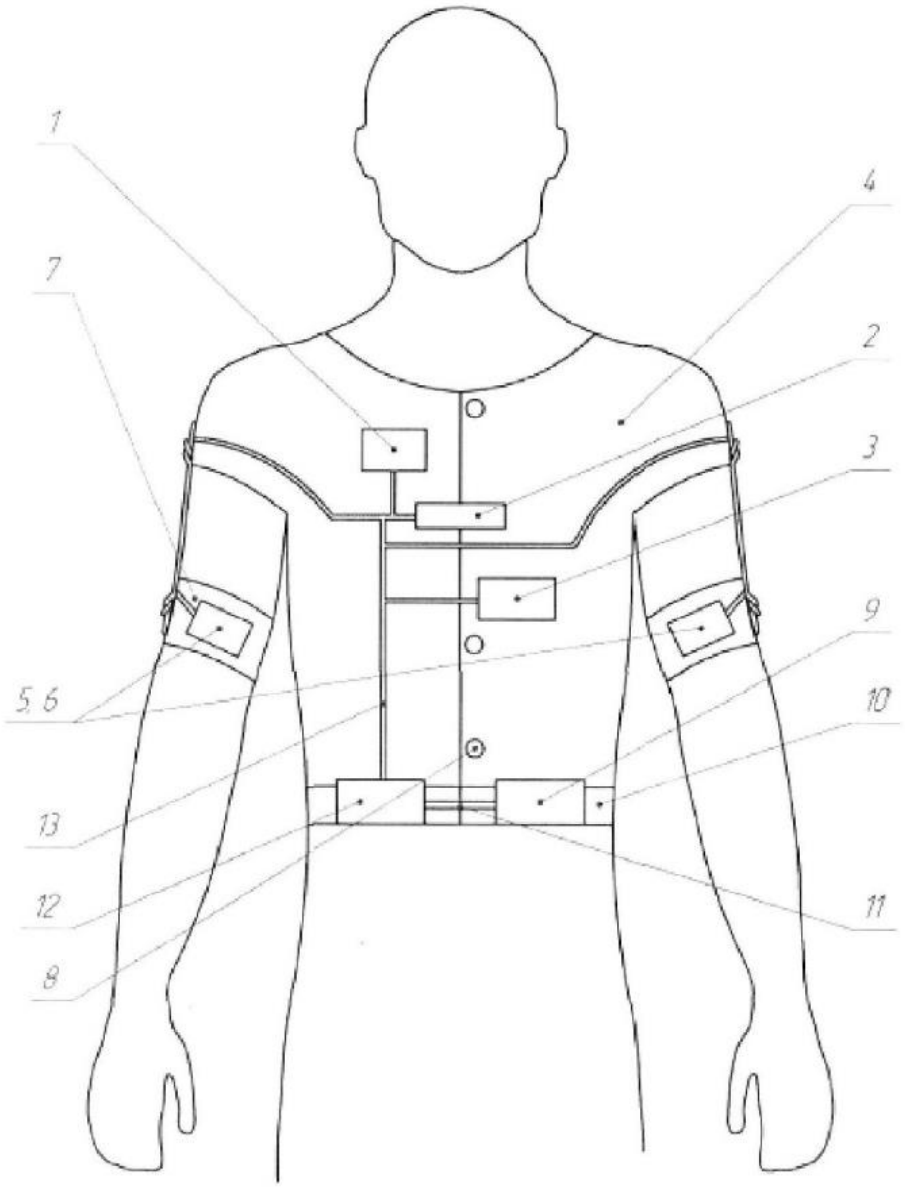
Налаштування датчиків і виконання необхідних підключень виконує медичний працівник. Він також встановлює програму і визначає критичні показники датчиків.

Застосування аналізатору дозволяє визначати психоемоційний стан оператора під час несення вахти, що дає змогу попередити наслідки негативного прояву людського фактору па морському транспорті.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Аналізатор психоемоційного стану оператора, що містить датчики температури тіла та частоти пульсу, які прилягають до тіла оператора, датчики артеріального тиску, які прилягають до плечових частин рук оператора, який **відрізняється** тим, що аналізатор виконаний у вигляді жилету із міцної тканини, який розташований на тілі оператора, манжетів, які закріплені на плечових частинах рук оператора, та поясу, на якому розміщені мікрокомпресор, блок управління та блок живлення, датчики температури тіла та частоти пульсу розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на жилеті, датчики артеріального тиску також розміщені у корпусах, які закріплені вакуумними присосками у гніздах на манжетах, а також встановлені датчик частоти дихання, що прилягає до тіла людини, корпус якого закріплений вакуумною присоскою у гнізді на жилеті, датчики тремору рук, що прилягають до плечових частин рук оператора, корпуси яких закріплені вакуумними присосками у гніздах манжетів, корпуси датчиків через канали для відкачування повітря з'єднані з мікрокомпресором

для відкачування повітря і вакуумної фіксації корпусів датчиків до жилету та манжетів, датчики температури тіла, частоти пульсу, артеріального тиску, частоти дихання, тремору рук електричними та інформаційними дротами з'єднані з блоком управління для передачі даних і оброблення їх у блоці управління, відповідно до заданого алгоритму, для формування попереджувальної звукової і візуальної сигналізації при виявленні критичних показників психоемоційного стану, передачі оброблених даних на віддалений сервер для отримання управлінських рішень та корегування дій оператора.



Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601