

УДК 656.61.052:004

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-172-197

Е-НАВІГАЦІЯ ЯК ІНФРАСТРУКТУРНА ОСНОВА РОЗВИТКУ АВТОНОМНОГО ТА БЕЗЕКІПАЖНОГО СУДНОПЛАВСТВА

О.І. Россомаха

к.т.н, доцент, доцент кафедри навігації і керування судном

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4425-2192>

eirossomakha@gmail.com

Г.Г. Томчаковський

старший викладач кафедри навігації і керування судном

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>

gtomchakovsky@gmail.com

О.С. Саф'ян

старший викладач кафедри навігації і керування судном

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8866-7456>

oleg.sos52@gmail.com

Л.Е. Оберто Сантана

старший викладач кафедри навігації і керування судном

ORCID <https://orcid.org/0009-0009-4407-3766>

Leonixoberto@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті здійснено комплексний аналіз міжнародного досвіду формування та впровадження концепції е-Навігації як ключового напрямку цифрової трансформації морського судноплавства.

Розглянуто еволюцію стратегічних підходів Міжнародної морської організації до створення інтегрованого інформаційного середовища «судно – берег – судно», що базується на стандартизованому зборі, обміні, представленні та аналізі морських даних.

Особливу увагу приділено оновленому Плану реалізації стратегії е-Навігації (MSC.1/Circ.1595), подальшому розвитку описів морських сервісів (MSC.1/Circ.1610, MSC.1/Circ.1610/Rev.1) та формуванню архітектури цифрових морських послуг.

Проаналізовано трикомпонентну структуру е-Навігації (бортовий, береговий та комунікаційний компоненти) як основу створення єдиної ситуаційної картини морського простору.

© Россомаха О.І., Томчаковський Г.Г., Саф'ян О.С., Л.Е. Оберто Сантана., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Показано, що інтеграція суднових навігаційних систем, сервісів управління рухом суден (VTS) та сучасних телекомунікаційних технологій забезпечує підвищення безпеки мореплавства, оптимізацію маршрутів і зниження операційних витрат.

Окремо досліджено роль стандарту ІНО S-100 як універсальної геопросторової моделі даних для електронних навігаційних продуктів нового покоління (S-101, S-102, S-104, S-111, S-124), що формують технологічну основу S-100 ECDIS та забезпечують інтероперабельність систем. Значну увагу приділено взаємозв'язку е-Навігації та розвитку безпечного судноводіння.

Встановлено, що ефективне функціонування автономних і дистанційно керованих суден можливе лише за умови наявності розвиненої цифрової інфраструктури, стандартизованого маршрутного обміну (STM), комунікаційної платформи Maritime Connectivity Platform та інтегрованих сервісів управління ризиками.

Розкрито значення людського елементу в контексті цифровізації: доведено, що автоматизація не усуває повністю ризики, а трансформує їх характер, що потребує нових підходів до підтримки прийняття рішень, ергономіки інтерфейсів і адаптивних систем моніторингу когнітивного навантаження операторів.

У роботі узагальнено результати міжнародних тестових акваторій і пілотних проєктів (MONALISA 2.0, EfficienSea2, Yangshan Port e-NAV, ESESAME Straits, TICON), які підтвердили можливість зниження навігаційних ризиків, скорочення витрат палива та зменшення викидів CO₂ завдяки гармонізованому обміну даними та інтеграції морських сервісів.

Показано, що сучасний етап розвитку е-Навігації характеризується переходом до інтелектуалізованої людиноцентричної цифрової екосистеми, де поєднуються стандарти S-100, концепція цифрового двійника навігаційних вод, системи STM і платформи безпечної комунікації. Обґрунтовано, що подальше впровадження е-Навігації має ітераційний характер і потребує узгодженої взаємодії міжнародних організацій, національних адміністрацій, наукових установ і приватного сектору.

Перспективи розвитку пов'язані з інтеграцією багатопланових геопросторових даних у режимі реального часу, удосконаленням систем підтримки рішень та формуванням повністю цифрового середовища управління морським рухом.

Отримані результати можуть бути використані для розробки нормативно-методичних засад впровадження е-Навігації та формування стратегії розвитку автономного судноплавства.

Ключові слова: *е-Навігація, безпечне судно, управління ризиками, тестова акваторія, цифрова навігація, людська помилка, автономні судна, стандарт S-100, морська інформаційна платформа.*

UDC 656.61.052:004

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-172-197

E-NAVIGATION AS AN INFRASTRUCTURE BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS AND UNMANNED SHIPPING

Olena Rossomakha

PhD, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Navigation and Control of the Ship,

Georgiy Tomchakovsky

Senior Lecturer of the Department of Navigation and Control of the Ship

Oleh Safyan

Senior Lecturer of the Department of Navigation and Control of the Ship

Leonid Oberto Santana

Senior Lecturer of the Department of Navigation and Control of the Ship

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *This article provides a comprehensive analysis of international experience in developing and implementing the concept of e-Navigation as a key area of digital transformation in maritime shipping. It examines the evolution of the International Maritime Organization's strategic approaches to creating an integrated "ship–shore–ship" information environment based on the standardized collection, exchange, presentation, and analysis of maritime data. Particular attention is paid to the updated Implementation Plan for the e-Navigation Strategy (MSC.1/Circ.1595), the further development of maritime service descriptions (MSC.1/Circ.1610, MSC.1/Circ.1610/Rev.1), and the development of the architecture for digital maritime services.*

The three-component structure of e-Navigation (on-board, shore-based, and communication components) is analyzed as the basis for creating a unified situational picture of the maritime domain. It is demonstrated that the integration of shipboard navigation systems, vessel traffic services (VTS), and modern telecommunications technologies enhances maritime safety, optimizes routes, and reduces operational costs. The role of the IHO S-100 standard as a universal geospatial data model for next-generation electronic navigation products (S-101, S-102, S-104, S-111, S-124), which form the technological basis of S-100 ECDIS and ensure system interoperability, is examined separately. Significant attention is paid to the relationship between e-Navigation and the development of unmanned navigation.

It has been established that the effective operation of autonomous and remotely controlled vessels is possible only if there is a well-developed digital infrastructure, standardized route exchange (STM), the Maritime Connectivity Platform, and integrated risk management services. The significance of the human element in the context of digitalization is revealed: it is demonstrated that automation does not completely eliminate risks but transforms their nature, requiring new approaches to decision support, interface ergonomics, and adaptive systems for monitoring operators' cognitive load. The paper summarizes the results of international test areas and pilot projects

(MONALISA 2.0, EfficienSea2, Yangshan Port e-NAV, ESESAME Straits, TICON), which confirmed the potential to reduce navigational risks, lower fuel consumption, and decrease CO₂ emissions through harmonized data exchange and the integration of maritime services.

It has been shown that the current stage of e-Navigation's development is characterized by a transition to an intelligent, human-centered digital ecosystem that integrates S-100 standards, the concept of a digital twin of navigable waters, STM systems, and secure communication platforms. It is argued that the further implementation of e-Navigation is iterative in nature and requires coordinated interaction among international organizations, national administrations, scientific institutions, and the private sector. Development prospects are linked to the integration of multi-layer geospatial data in real time, the improvement of decision support systems, and the creation of a fully digital maritime traffic management environment. The results obtained can be used to develop regulatory and methodological frameworks for the implementation of e-Navigation and to formulate a strategy for the development of autonomous shipping.

Keywords: *e-Navigation, unmanned vessel, risk management, test water area, digital navigation, human error, autonomous vessels, S-100 standard, maritime information platform.*

Вступ. Морський транспорт відіграє ключову роль у глобальній економіці, забезпечуючи понад 80 % світової торгівлі за обсягом. Зростання інтенсивності судноплавства, збільшення розмірів суден та ускладнення навігаційних умов у вузькостях та перевантажених портах створюють нові виклики для забезпечення безпеки мореплавства. За даними ІМО (International Maritime Organization, Міжнародна морська організація), щорічно у світі відбувається понад 1000 серйозних морських аварій, значна частина з яких пов'язана з навігаційними помилками. У цьому контексті цифровізація морської навігації стає не просто технологічною інновацією, а критичною необхідністю для збереження людських життів та захисту морського середовища.

У 2006 р. ІМО була розроблена концепція е-Навігації для підвищення керованості та безпеки морських суден та збільшення ефективності морського транспорту [1]. Е-Навігація являє собою ініціативу ІМО, засновану на забезпеченні інтеграції існуючих і нових навігаційних морських інструментів на цілісній і систематичній основі, що дозволить полегшити перехід навігаційної інформації у цифровий формат. Ця концепція стала відповіддю на зростаючу потребу морської індустрії в уніфікованих стандартах обміну даними та підвищенні ситуаційної обізнаності судноводіїв.

У даний час технології телекомунікацій, електронних датчиків і систем, технології е-Навігації вже впроваджуються у сфері морської індустрії [2]. Е-Навігація не обов'язково означає «електронну» навігацію, де остання є навігаційною технологією. Існуючі наукові розробки у сфері технології безкі-пажного судноводіння (БЕС) та її застосування досить докладно відображають ключові аспекти навігаційних систем, які автоматично управляють БЕС у різних

ситуаціях [3]. Впровадження технологій штучного інтелекту, машинного навчання та аналізу великих даних відкриває нові можливості для підвищення ефективності навігаційних рішень та мінімізації ризиків.

У найближчому майбутньому неможливо уявити судноплавство без БЕС. При цьому безекіпажне судноводіння напряму залежить від стану інфраструктури та впровадження технологій е-Навігації. Так, наприклад, проект БЕС «MUNIN» [4] є частиною систем стандартів морської інформаційної технології (MiTS, Maritime Information Technology Standards), які включають е-Навігацію [5]. Очікується, що внесок роботи «MUNIN» буде доступний для е-Навігації на основі співпраці в області «портфеля послуг» та діяльності з обробки даних S-100. Розвиток автономних суден стимулює створення нових сервісів е-Навігації, що забезпечують безперервний моніторинг, дистанційне управління та автоматизоване прийняття навігаційних рішень.

На сучасних судах, незважаючи на використання навігаційних систем, таких як інтегровані мостикові системи, автоматична ідентифікаційна система (AIC), радіолокаційний автопрокладчик, електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система (EKNIC) та глобальна морська система зв'язку під час лиха та для забезпечення безпеки (ГМЗЛБ, GMDSS), навігаційні помилки в результаті людського елемента є однією з головних причин морських аварій. Аналіз показує, що до 75 % морських інцидентів безпосередньо або опосередковано пов'язані з помилками людини, що підкреслює критичну важливість розробки систем підтримки прийняття рішень. У даний час ІМО прагне розробити навігаційні інструменти для того, щоб скоротити кількість морських аварій та створити інтегроване інформаційне середовище для всіх учасників морського транспортного процесу.

Основна частина. Е-Навігація – це комплексна концепція, орієнтована на підтримку в прийнятті рішень за допомогою управління морською інформацією [6]. Розробка концепції розпочалася у 2005 році, коли морська спільнота усвідомила необхідність гармонізації та стандартизації навігаційних систем на глобальному рівні. Латинська літера «е» в даній концепції має кілька різних смислових значень (рис. 1), які відображають багатогранність підходу: enhanced (покращена), efficient (ефективна), electronic (електронна), environmental (екологічна) та economic (економічна), essential (суттєва), evolved (розвинена) навігація. Кожне з цих значень підкреслює певний аспект концепції, створюючи комплексне бачення майбутнього морського судноплавства.

Концепція е-Навігації передбачає фундаментальну зміну парадигми морської навігації – від розрізнених систем та несумісних форматів даних до інтегрованого інформаційного середовища, де всі учасники морського транспортного процесу мають доступ до актуальної, достовірної та стандартизованої інформації. Це включає не лише технічні елементи передачі даних, але й організаційні, правові та людські фактори, що забезпечують ефективне використання нових можливостей.

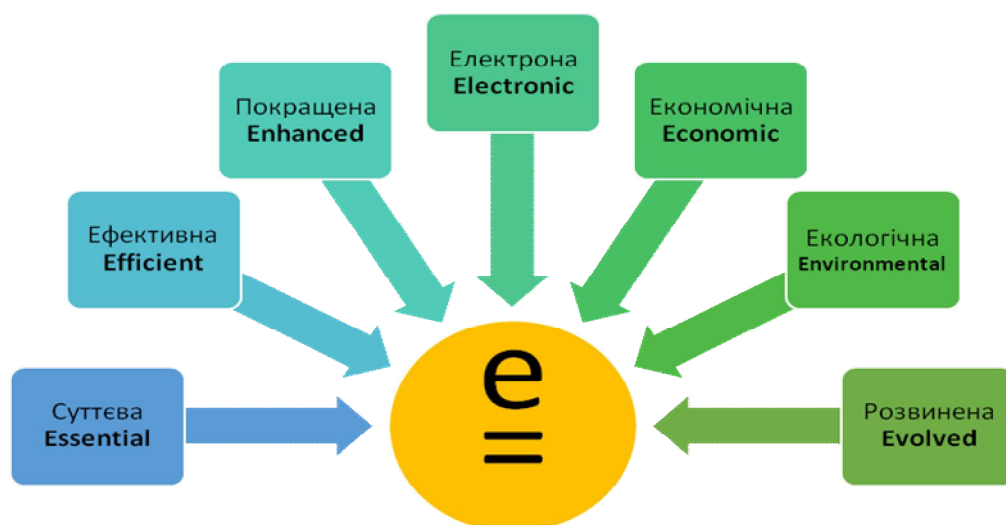


Рис. 1. Смысловые значения латинской литеры «е» в e-Навигации

Джерело: розроблено авторами на основі [6]

На 99-й сесії, що відбулася 16–25 травня 2018 р., Комітет ІМО з безпеки на морі прийняв ряд ключових регуляторних елементів в області зв'язку та навігації. Так, ним був затверджений оновлений план реалізації стратегії e-Навігації ІМО та тимчасові керівні принципи узгодженого відображення навігаційної інформації, одержуваної за допомогою засобів зв'язку [7]. Ці рішення стали важливим кроком у напрямку практичної реалізації концепції, встановивши чіткі часові рамки та відповідальність різних зацікавлених сторін.

У рамках проведеної 3-7 грудня 2018 р. в Лондоні 100-ї сесії Комітету з морської безпеки ІМО були визначені чотири рівні автономії суден (рис 2) [8]. Перший рівень передбачає судно з автоматизованими процесами та підтримкою прийняття рішень, де екіпаж залишається на борту для контролю систем. Другий рівень допускає дистанційне управління при наявності екіпажу на борту, готового взяти управління на себе. Третій рівень характеризується повністю дистанційним управлінням без екіпажу на борту. Четвертий рівень представляє повністю автономне судно, здатне самостійно приймати рішення та визначати дії.

Ці рівні відображають еволюцію від повністю керованих людиною суден до повністю автономних систем, що є критично важливим для розвитку e-Навігації та створення відповідної інфраструктури підтримки.

ІМО пропонує наступне робоче визначення e-Навігації: «...узгоджений збір, інтеграція, обмін, представлення та аналіз морської інформації на борту та на березі за допомогою електронних засобів з метою підвищення ефективності судноплавства від причалу до причалу та відповідних послуг із забезпечення безпеки та охорони на морі та захисту морського середовища» [9]. Це визначення підкреслює

всеохоплюючий характер концепції, що охоплює весь цикл морського перевезення – від планування рейсу до прибуття в порт призначення.

Рівень 1 Судно з автоматизованими процесами та підтримкою прийняття рішень		
- Екіпаж присутній на борту і керує судном - Деякі операції можуть виконуватись автоматично	- Системи підтримки прийняття рішень активні - Екіпаж може перебирати управління	IMO MSC 99/5/5 IMO MSC 100/5/6
Рівень 2 Дистанційно кероване судно з екіпажем на борту		
- Дистанційне керування з берега - Екіпаж присутній для перехоплення управління	- Більшість систем автоматизовані - Моніторинг систем здійснюється з берега	IMO MSC 99/5/5 IMO MSC 100/5/6
Рівень 3 Дистанційно кероване судно без екіпажу на борту		
- Повністю дистанційне керування - Відсутній екіпаж на борту	- Всі системи контролюються з берега - Автоматичні системи безпеки активні	IMO MSC 99/5/5 IMO MSC 100/5/6
Рівень 4 Повністю автономне судно		
- Бортова операційна система приймає рішення - Повна автоматизація всіх систем	- Самостійне визначення дій - Мінімальне людське втручання	IMO MSC 99/5/5 IMO MSC 100/5/6

Рис. 2. Чотирирівнева система класифікації автономності морських суден

Джерело: [8]

Основною метою е-Навігації є створення цифрової інфраструктури, що надає передачу необхідних інформаційних даних для підвищення навігаційної безпеки суден та забезпечення оптимального управління, в тому числі БЕС. Ця інфраструктура має забезпечувати безперебійний обмін інформацією між усіма учасниками морського транспорту: суднами, портами, береговими службами, лоцманськими станціями, системами управління рухом суден (VTS), національними та міжнародними регуляторними органами. Крім того, е-Навігація сприяє зниженню операційних витрат, оптимізації маршрутів з урахуванням метеорологічних умов та зменшенню негативного впливу судноплавства на довкілля через скорочення викидів шкідливих речовин.

Суть розуміння концепції е-Навігації розглянемо на прикладі Норвезької берегової адміністрації «Kystverket» [10]. Адміністрація розглядає три основних елементи для розуміння концепції е-Навігації (рис. 3): бортовий компонент, компонент зв'язку та береговий компонент.

Ця трикомпонентна архітектура забезпечує цілісний підхід до управління морською інформацією, де кожен елемент виконує специфічні функції, але всі вони тісно взаємопов'язані та взаємозалежні. Бортовий компонент – це навігаційні системи, які працюють залежно від інтеграції судових датчиків, допоміжної інформації, стандартного користувальницького інтерфейсу та комплексної системи управління охоронними зонами та оповіщеннями.

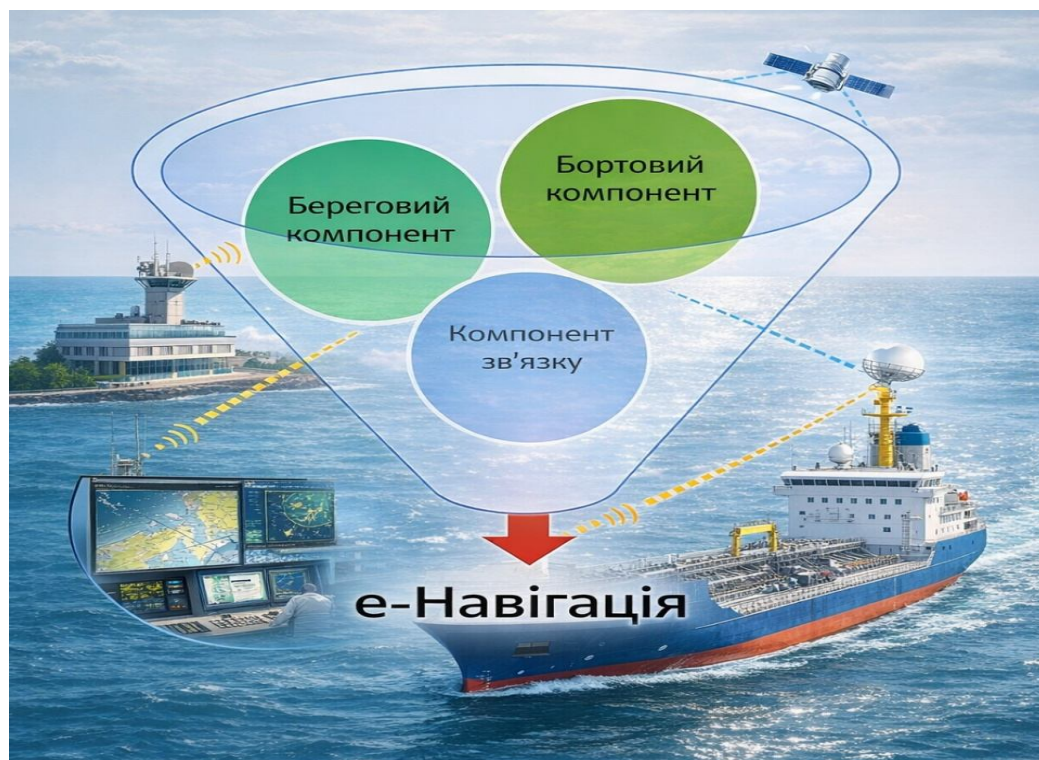


Рис. 3. Основні компоненти e-Навігації

Джерело: власна розробка авторів

Цей компонент включає інтегровану навігаційну систему (ІНС), яка об'єднує дані від різноманітних джерел: супутникових навігаційних систем (GNSS), радіолокаційних станцій (РЛС), автоматичної ідентифікаційної системи (АІС), електронних картографічних навігаційних інформаційних систем (ЕКНІС), ехолотів, гірокомпасів та інших датчиків. Ключовою особливістю бортового компонента є стандартизований інтерфейс користувача, що мінімізує когнітивне навантаження на судноводія та знижує ймовірність помилок при інтерпретації даних. Сучасні ІНС здатні автоматично виявляти конфлікти між різними джерелами інформації, попереджати про потенційні небезпеки та надавати рекомендації щодо оптимальних навігаційних рішень.

Береговий компонент – це управління рухом суден та обмін даними в форматах, які будуть більш зрозумілі та використані береговими операторами для підтримки безпеки та ефективності суден. Береговий компонент включає центри управління рухом суден (Vessel Traffic Services, VTS), інформаційні системи портів, лоцманські станції, метеорологічні служби та національні координаційні центри. Ці берегові служби отримують від суден телеметричну інформацію в

режимі реального часу, що дозволяє здійснювати комплексний моніторинг морського простору, координувати рух суден у складних навігаційних умовах, оперативно реагувати на аварійні ситуації та надавати судноводіям актуальну інформацію про гідрометеорологічні умови, навігаційні небезпеки та рекомендовані маршрути.

Компонент зв'язку призначений для створення інфраструктури, що забезпечує безперешкодну передачу інформації на борту суден, між суднами та між суднами і берегом [10]. Цей компонент є критично важливим для функціонування всієї системи е-Навігації, оскільки забезпечує обмін даними в реальному часі. Для реалізації комунікаційних функцій використовуються різноманітні технології: супутниковий зв'язок (INMARSAT, Iridium), наземні радіосистеми (VHF, MF/HF), високошвидкісні берегові мережі (4G/5G), спеціалізовані морські комунікаційні протоколи. Особлива увага приділяється забезпеченню надійності, безперервності та кібербезпеки каналів передачі даних, оскільки від цього залежить функціонування критичних навігаційних систем.

Інтеграція всіх трьох компонентів створює синергетичний ефект, що значно перевищує можливості кожного окремого елемента. Завдяки безперервному обміну інформацією між бортовими системами та береговими службами формується єдина ситуаційна картина морського простору, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення на основі повної та актуальної інформації. Це особливо важливо в умовах інтенсивного судноплавства, складних гідрометеорологічних умов або при проходженні небезпечних районів.

План реалізації стратегії е-Навігації, затверджений ІМО в 2014 р. [11], містить перелік завдань до 2019 р., спрямованих на виконання п'яти пріоритетних проблем е-Навігації (рис. 4). Цей план став результатом багаторічної роботи експертних груп, що включали представників морських адміністрацій, судноплавних компаній, виробників обладнання та наукових установ з понад 70 країн світу. Розробка плану базувалася на глибокому аналізі існуючих навігаційних систем, виявленні їх недоліків та визначенні шляхів покращення. Актуалізована редакція Плану реалізації стратегії е-Навігації (MSC.1/Circ.1595, Update 1, 2018) підтвердила пріоритетність визначених напрямів та уточнила механізми їх впровадження.

Подальший розвиток концепції відображено в документах MSC.1/ Circ.1610 (2019) та MSC.1/Circ.1610/Rev.1 (2024), які містять систематизовані описи морських сервісів у контексті е-Навігації та конкретизують функціональні аспекти цифрового обміну даними між судном і берегом [12-14]. Водночас впровадження стандарту ІНО S-100 [15-18] і пов'язаних із ним специфікацій цифрових продуктів формує технологічну основу сучасних сервісів е-Навігації, забезпечуючи інтероперабельність навігаційних систем. Таким чином, хоча первинний План охоплював період до 2019 р., його реалізація триває, а нові документи ІМО розширюють і деталізують визначені стратегічні положення, не змінюючи їх концептуальної основи.

Кожне з цих рішень адресує конкретні проблеми морської індустрії та пропонує технічні та організаційні заходи для їх вирішення.

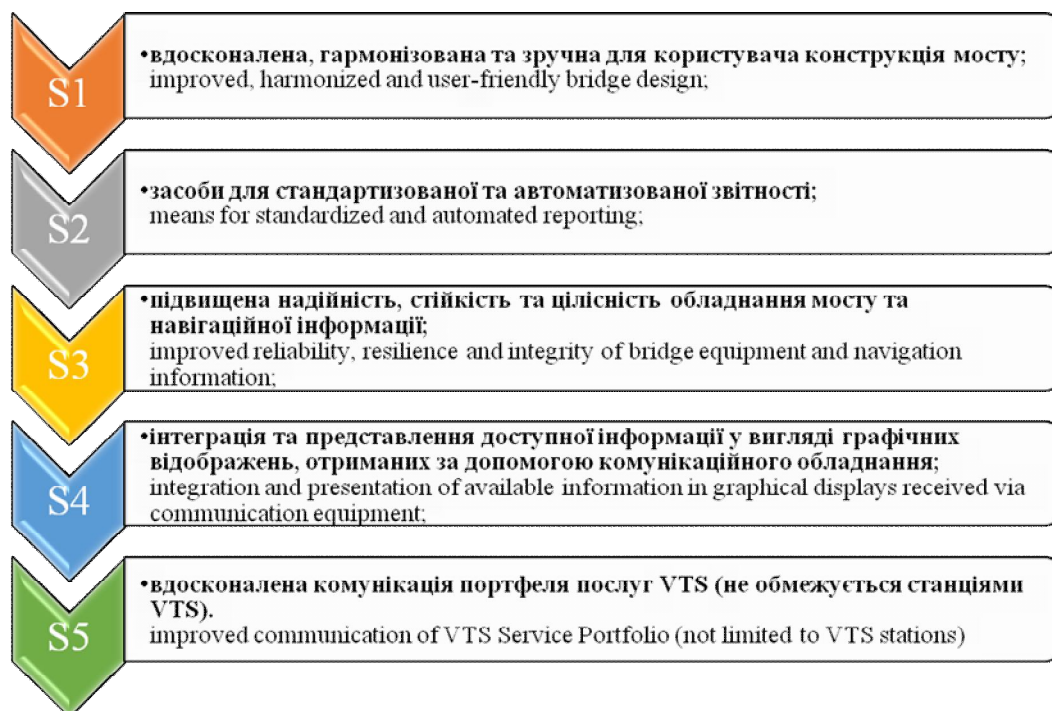


Рис. 4. План ІМО для реалізації рівнів е-Навігації

Джерело: [12]

Рішення S1 спрямоване на покращення надійності та стійкості навігаційних систем шляхом забезпечення резервування критичних функцій та інтеграції даних з множинних джерел. Рішення S2 фокусується на стандартизації обміну інформацією між суднами, що особливо важливо для попередження зіткнень та координації маневрів. Рішення S3 передбачає створення стандартизованих інтерфейсів відображення інформації для зменшення когнітивного навантаження на судноводіїв. Рішення S4 спрямоване на інтеграцію берегових сервісів, включаючи VTS, гідрометеорологічні дані та навігаційні попередження. Рішення S5 забезпечує стандартизацію морських сервісів відповідно до архітектури морської хмари (Maritime Cloud).

Рішення S2, S4 та S5 концентрують увагу на ефективній передачі морської інформації та даних між усіма відповідними користувачами (судно – судно, судно – берег, берег – судно і берег – берег). Рішення S1 і S3 сприяють ефективному та практичному використанню інформації та даних на борту [19].

Варто зазначити, що е-Навігація не є статичною концепцією. Реалізація цієї стратегії буде тривати відповідно до змін потреб користувачів та появи нових технологій, які забезпечують створення більш ефективних і дієвих систем [20]. Динамічний характер стратегії передбачає регулярний перегляд та оновлення технічних специфікацій, стандартів та регуляторних вимог з урахуванням технолог-

гічного прогресу, накопиченого досвіду експлуатації та змінюваних потреб морської спільноти.

При цьому реалізація стратегії е-Навігації є поетапним ітераційним процесом безперервного розвитку (рис. 5). П'ять можливих компонентів в рамках плану реалізації стратегії е-Навігації включають: потреби користувачів, «архітектура» та аналіз, аналіз прогалин, реалізація, огляд висновків.

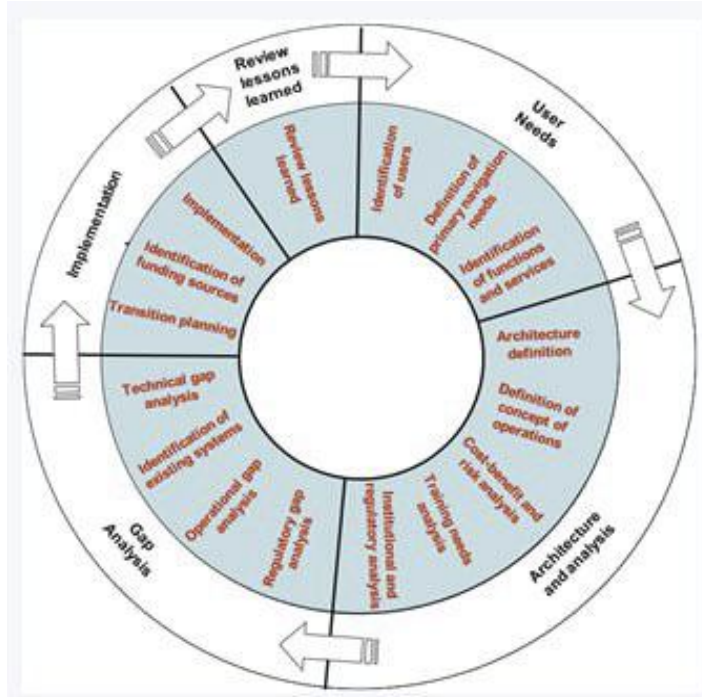


Рис. 5. Компоненти розробки процесу впровадження е-Навігації

Джерело: [12]

Ітераційний підхід дозволяє поступово впроваджувати нові функції та сервіси, тестувати їх в реальних умовах, отримувати зворотний зв'язок від користувачів та вносити необхідні корективи перед масштабуванням на глобальному рівні.

Компонент «Потреби користувачів» (User Needs) передбачає систематичний збір та аналіз вимог від різних зацікавлених сторін, включаючи судноводіїв, операторів VTS, лоцманів, портових операторів та регуляторні органи. Компонент «Архітектура та аналіз» (Architecture and analysis) фокусується на розробці технічної архітектури системи, визначенні протоколів обміну даними та стандартів інтероперабельності. «Аналіз прогалин» (Gap Analysis) виявляє розбіжності між бажаним станом та поточними можливостями, визначаючи пріоритети для розробки. Компонент «Впровадження» (Implementation) включає створення пілотних проєктів, тестових акваторій та поступове впровадження сервісів. «Огляд

висновків» (Review lessons learned) забезпечує оцінку ефективності впроваджених рішень та формування рекомендацій для подальшого вдосконалення.

ІМО працює в тісному союзі з Міжнародною асоціацією морських засобів навігації та маячних служб (МАМС, IALA, International Association of Lighthouse Authorities) та Міжнародною гідрографічною організацією (МГО, ІНО, International Hydrographic Organization) в області е-Навігації. Ця триєдина співпраця формує основу глобальної координації зусиль з розробки, стандартизації та впровадження е-Навігації. Кожна організація відповідає за певний елемент концепції, але всі вони працюють в узгодженому режимі, забезпечуючи комплексний підхід до цифровізації морської навігації.

ІМО, як провідна міжнародна морська організація, встановлює регуляторні рамки та загальну стратегію розвитку е-Навігації, координує роботу держав-членів та забезпечує узгодженість з міжнародними конвенціями з безпеки мореплавання (SOLAS, STCW). Через систему комітетів та підкомітетів ІМО розробляє обов'язкові вимоги до обладнання та процедур, що забезпечує уніфікований підхід до впровадження е-Навігації в глобальному масштабі.

МАМС бере участь у розробці концепції е-Навігації для забезпечення «архітектурної роботи», включаючи комунікаційні технології, апаратне та програмне забезпечення. Вона розробляє пропонувану універсальну модель морських даних для цифрової навігації з метою задоволення вимог, що впливають з майбутнього впровадження е-Навігації. МАМС відповідає за розробку технічних специфікацій засобів навігаційного обладнання (Aids to Navigation, AtoN), VTS та морських інформаційних сервісів (Maritime Information Services, MIS). Організація активно працює над створенням Common Maritime Data Structure (CMDS) – загальної структури морських даних, яка забезпечує стандартизований формат обміну інформацією між різними системами.

МГО відповідає за будь-які гідрографічні стандарти, продукти та послуги з е-Навігації. У січні 2010 р. МГО розробила перше видання рамкового геопросторового стандарту S-100 для гідрографічних та пов'язаних даних. Переглянуте та покращене друге видання S-100 було опубліковано в червні 2012 р. З того часу стандарт продовжує розвиватися, і станом на 2024 рік діє п'яте видання, що включає численні вдосконалення та нові специфікації продуктів.

Стандарт S-100 залежно від серій ІСО 19100 географічних стандартів забезпечує базу даних для розробки наступного покоління продуктів електронних навігаційних карт (ЕНК, ENC, Electronic Navigational Charts), а також інших пов'язаних цифрових продуктів, необхідних спільнотам гідрографічних, морських та географічної інформаційної системи (ГІС) [17]. На основі S-100 розроблено понад 20 специфікацій продуктів, включаючи S-101 (електронні навігаційні карти нового покоління), S-102 (батиметричні поверхні), S-104 (інформація про водні рівні), S-111 (поверхневі течії), S-124 (навігаційні попередження) та інші.

На початку 2011 р. ІМО повідомила про те, що стандарт S-100 буде грати важливу роль у гідрографічних та більш широких морських областях, тому його слід розглядати як базовий рівень та важливий елемент в концепції е-Навігації. Впровадження S-100 дозволяє забезпечити інтероперабельність між різними

навігаційними системами, сприяє стандартизації обміну даними та створює основу для розробки нових інноваційних морських сервісів.

Крім цих трьох ключових організацій, у розвитку е-Навігації активну участь беруть регіональні об'єднання, такі як Європейська морська агенція з безпеки (EMSA), Балтійська та міжнародна морська рада (BIMCO), національні морські адміністрації та приватний сектор. Регіональні проєкти, такі як MONALISA 2.0 [21] в Балтійському морі або EfficienSea2 [22] в Північній Європі, демонструють практичне застосування концепції е-Навігації та надають цінний досвід для глобального впровадження. Координація зусиль на різних рівнях (глобальному, регіональному та національному) є критично важливою для успішної реалізації стратегії е-Навігації. Дослідження показали [9, 23, 24], що 60-90 % великих аварій у транспортних системах, таких як авіація та судноплавство, мають людську помилку в якості основної причини. Відсутність людини на БЕС сприяє зменшенню кількості морських аварій, що виникають через людські помилки. З іншого боку, може виникнути фактор людської помилки в рамках віддаленого управління БЕС. Проблема людського елемента залишається актуальною навіть в умовах автоматизації, оскільки змінюється лише характер помилок – від безпосередніх навігаційних до помилок проектування систем, їх обслуговування та віддаленого управління.

Людські помилки, які викликають навігаційні аварії, є важливим елементом для зацікавлених сторін, що беруть участь у реалізації е-Навігації, таких як міжнародні організації, дослідницькі інститути, судноплавні компанії, верфі, відповідні виробники обладнання тощо. Технології е-Навігації значно підвищують ефективність та безпеку судноплавства шляхом створення інтегрованого цифрового середовища для обміну інформацією між судном та берегом. Інтеграція різноманітних навігаційних систем, датчиків та джерел інформації дозволяє знизити когнітивне навантаження на судноводіїв та мінімізувати ризики неправильної інтерпретації даних. У процесі реалізації стратегії потреби користувачів є основним компонентом. Дана стратегія покликана підвищити безпеку судноплавства за рахунок скорочення числа людських помилок або можливості завчасно уникнути їх за допомогою таких наборів інструментів, як сім видів опцій управління ризиками (OYP, RCO, Risk Control Option) [12]. Основні опції управління ризиками, що сприяють оцінці пріоритетних рішень е-Навігації [25], представлені на рис. 6. Ці опції включають покращення інформаційного забезпечення, стандартизацію процедур, автоматизацію критичних функцій, удосконалення систем підтримки прийняття рішень, розвиток систем моніторингу та контролю, підвищення ергономічності обладнання та вдосконалення підготовки персоналу.

Аналіз даних [26] демонструє, що найбільший потенціал зниження ризиків пов'язаний з впровадженням інтегрованих систем відображення навігаційної інформації, покращенням комунікації між судном та берегом, а також стандартизацією форматів представлення даних. Експертні оцінки вказують на можливість зниження ризику людських помилок від 20 % до 60 % залежно від конкретної опції управління ризиками та умов її застосування.



Рис. 6. Основні опції управління ризиками ІМО

Джерело: розроблено авторами на основі [12]

Важливо відзначити, що розуміння механізмів виникнення людських помилок та ефективності різних методів їх мінімізації є критично важливим для проектування як систем підтримки екіпажів традиційних суден, так і систем повністю автономного судноводіння. Системний підхід до аналізу помилок враховує не лише прямі причини інцидентів, але й організаційні фактори, умови праці, якість підготовки персоналу та особливості людино-машинної взаємодії.

Аналіз дослідження [8; 25; 26; 32] морських аварій, викликаних людським елементом, формує предметне поле для реалізації безекіпажного судноводіння. Дослідження в даній роботі тематики е-Навігації є частиною загального дослідження в області БЕС внаслідок взаємозв'язку предметних областей. Досвід впровадження технологій е-Навігації на традиційних суднах створює технологічну та організаційну основу для майбутнього переходу до автономного судноплавства, забезпечуючи необхідну цифрову інфраструктуру та стандарти обміну даними.

Реалізація концепції е-Навігації є складним процесом, що вимагає комплексного підходу до впровадження інноваційних технологій у морську індустрію. Слід зазначити, що подальша розробка та практичне втілення цифрової навігації може бути здійснене виключно за активної підтримки та участі проєктів тестових акваторій (ТА, ТВ, Test-Beds), які відіграють критично важливу роль у валідації технологічних рішень та верифікації їх ефективності в реальних умовах експлуатації.

Тестові акваторії представляють собою спеціально обладнані морські зони, де в контрольованих умовах проводиться апробація новітніх навігаційних систем, технологій передачі даних, інтерфейсів взаємодії між судновими та береговими компонентами е-Навігації. Ці проекти дозволяють визначити технічні обмеження, виявити потенційні проблеми інтероперабельності різних систем, оцінити вплив людського елемента на ефективність використання нових технологій та розробити оптимальні процедури їх застосування до масштабного впровадження в глобальному судноплаванні.

Важливість тестових акваторій полягає у їх здатності забезпечити безпечне середовище для експериментування з інноваційними рішеннями без ризику для безпеки судноплавства та морського довкілля. Вони створюють унікальну можливість для співпраці між різними зацікавленими сторонами – судноплавними компаніями, виробниками обладнання, науковими установами, регуляторними органами та міжнародними організаціями. Результати, отримані в рамках проектів тестових акваторій, формують емпіричну базу для прийняття обґрунтованих рішень щодо стандартизації технологій е-Навігації на міжнародному рівні, а також надають цінні дані для розробки нормативно-правової бази, необхідної для впровадження цих технологій у повсякденну морську практику.

Тестові акваторії також виконують функцію «живих лабораторій», де відбувається безперервний процес удосконалення технологій на основі зворотного зв'язку від користувачів – судноводіїв, операторів берегових служб, портових операторів. Цей ітеративний підхід до розробки гарантує, що остаточні рішення е-Навігації будуть не лише технологічно досконалими, але й максимально адаптованими до реальних потреб морської індустрії, ергономічними та зручними у використанні.

У період функціонування в 2014-2015 рр. німецької тестової акваторії «TICON» [27] проект був сфокусований на «інтеграції переданих геоданих та/або інформації, що стосується безпеки (рівень і течія води, лід), в бортові навігаційні системи» [28]. Проект реалізовувався в акваторії Німецької бухти Північного моря та річки Ельби, де інтенсивне судноплавство поєднується зі складними гідрометеорологічними умовами. Основна увага приділялася розробці стандартизованих інтерфейсів для передачі інформації про навігаційну обстановку від берегових служб безпосередньо на містки суден. Інноваційним елементом проекту стало впровадження адаптивного відображення навігаційної інформації залежно від поточних погодних умов та рівня небезпеки. Результати проекту «TICON» продемонстрували зниження навігаційних ризиків на 25 % завдяки своєчасному отриманню екіпажами критично важливої інформації про стан акваторії.

У 2014-2017 рр. норвезька компанія «Kongsberg Norcontrol IT» запустила проект тестової акваторії «ESESAME Straits» (Secure, Efficient, and Safe maritime traffic Management in the Straits of Malacca and Singapore) [21]. Компанія займалася розробкою нової системи управління рухом суден та оптимізації морських транспортних потоків. Основною метою проекту було заявлено розробку та підтвердження загальної ситуаційної обізнаності і спільного прийняття рішень між командою мостика та береговими операторами [29]. Проект мав особливе значення

для регіону Малаккської протоки – однієї з найбільш завантажених морських магістралей світу, де щорічно проходить понад 94000 суден. Система передбачала створення єдиного інформаційного простору для координації дій береговими службами управління рухом суден трьох країн: Сингапуру, Малайзії та Індонезії, що дозволило підвищити пропускну здатність протоки на 15 % при одночасному зниженні ризиків зіткнень. Інноваційна технологія прогнозування траєкторій руху суден з використанням машинного навчання забезпечила можливість запобігання небезпечним зближенням за 20-30 хвилин до потенційного інциденту.

Другорядні цілі проекту включали:

- розробку надійного людського елемента та організаційних принципів для спільного прийняття рішень між судном і берегом;
- розробку нової парадигми надання послуг для систем на судні та на березі;
- збір та аналіз реальних даних про рух суден, які будуть використовуватися в якості контрольних значень для оцінок та для моделювання тощо.

У 2014-2016 рр. у Китаї виконувалася робота з реалізації проекту «Yangshan Port e-NAV», загальною метою якого було поліпшення системи гарантій навігаційної безпеки в умовах поганої видимості та надання комплексної, своєчасної, надійної та ефективної навігаційної інформації та послуг для суден [30-32]. Проєкт був реалізований в акваторії глибоководного порту Яншань, що обслуговує Шанхай – один з найбільших контейнерних портів світу з обробкою понад 47 мільйонів TEU на рік. Особлива увага приділялася навігаційному забезпеченню в умовах густих туманів, які щорічно створюють складнощі для судноплавства протягом 50-70 днів. Система включала мережу берегових радіолокаційних станцій високої роздільної здатності, автоматизовану систему ідентифікації небезпечних зближень та централізовану службу управління рухом суден з можливістю дистанційного пілотування в критичних ситуаціях. Впровадження технологій е-Навігації дозволило зберегти нормальний режим роботи порту навіть при видимості менше 500 метрів, що раніше призводило до повної зупинки вантажних операцій.

У 2013-2015 рр. реалізовувався масштабний міжнародний проєкт MONALISA 2.0 [33], що об'єднав 47 партнерів з 13 європейських країн для створення інтегрованої системи управління морським трафіком. Проєкт мав загальний бюджет 24 мільйони євро, половина з яких фінансувалася Європейською Комісією в рамках програми TEN-T [34]. Основним досягненням проєкту стала розробка концепції Sea Traffic Management (STM) [35] – морського еквіваленту авіаційного управління повітряним рухом, що передбачає централізований обмін інформацією між усіма учасниками морського транспорту. В рамках проєкту було розроблено стандартизовані формати маршрутної інформації, що дозволяють судноплавним компаніям, портам та службам VTS обмінюватися даними про заплановані та фактичні маршрути суден в режимі реального часу. Тестування системи STM в акваторіях Балтійського та Середземного морів продемонструвало економію палива до 10 % завдяки оптимізації маршрутів та зниження часу очікування в портах на 15-20 % [36].

Проект EfficienSea2 [22], що виконувався в 2015-2018 рр., став логічним продовженням концепції STM та залучив 32 партнери з усього Балтійського регіону. Загальний бюджет проекту склав 20 мільйонів євро, причому акцент було зроблено на практичному впровадженні технологій е-Навігації в повсякденну діяльність морських операторів. Ключовою інновацією стала розробка відкритої цифрової платформи Maritime Cloud [37], що забезпечила безпечний обмін навігаційною інформацією між усіма зацікавленими сторонами незалежно від їх технічного оснащення. Платформа підтримувала передачу не лише статичної інформації про маршрути, але й динамічні дані про погодні умови, обмеження руху, робочі зони та інші фактори, що впливають на безпеку судноплавства. Особлива увага приділялася інтеграції даних для арктичного судноплавства, включаючи інформацію про льодову обстановку, що критично важливо для зростаючого трафіку Північним морським шляхом. Проект продемонстрував, що впровадження технологій STM може забезпечити зниження викидів CO₂ на 3-8 % завдяки більш ефективному плануванню та виконанню рейсів.

Розвиток е-Навігації на сучасному етапі характеризується переходом від окремих пілотних ініціатив до комплексної цифрової трансформації морської галузі [18; 38]. Одним із ключових чинників цього процесу стало впровадження стандарту ІНО S-100 як універсальної геопросторової основи для навігаційних продуктів нового покоління. У 2022-2025 рр. завершено формування першого операційного пакета стандартів S-100 (S-101 – ENC нового покоління, S-102 – батиметрія високої роздільної здатності, S-104 – рівні води, S-111 – поверхневі течії, S-124 – навігаційні попередження), що створює передумови для переходу до S-100 ECDIS як інтегрованого цифрового середовища судноводіння. Офіційні рішення держав-членів ІНО засвідчили набуття екосистемою S-100 операційного статусу та забезпечили якісно новий рівень інтероперабельності між судовими та береговими системами.

Паралельно у 2019-2021 рр. у межах проекту STM BALT SAFE було проведено масштабні випробування стандартизованого обміну маршрутною інформацією між суднами, портами та береговими службами в рамках концепції Sea Traffic Management (STM). Результати дослідження [35, 39] «STM Validation Cost-Benefit» підтвердили, що гармонізований обмін даними підвищує безпеку судноплавства та забезпечує економічний ефект за рахунок оптимізації швидкості руху, зменшення затримок і скорочення витрат палива. Отримані висновки обґрунтовують інтеграцію STM як структурного елемента е-Навігації.

У 2019-2024 рр. відбулося інституціональне закріплення Maritime Cloud / Maritime Connectivity Platform (MCP) [36] як комунікаційної інфраструктури е-Навігації. Платформа, побудована на архітектурі MIR–MSR–MMS (Maritime Identity Registry, Maritime Service Registry, Maritime Messaging Service), забезпечує безпечну ідентифікацію користувачів, контроль доступу та кіберзахищений обмін даними між суднами й береговими структурами. MCP розглядається як базовий механізм підтримки як традиційного, так і автономного судноплавства.

У 2020-2021 рр. здійснювалися практичні випробування дистанційно керованих та автономних суден у реальних рейсових умовах. Їх результати

продемонстрували, що безекіпажне судноводіння можливе лише за умови функціонування повноцінної інфраструктури е-Навігації, яка включає стандартизований маршрутний обмін, інтеграцію з VTS та доступ до багат шарових S-100-даних.

Подальший розвиток отримала концепція цифрового двійника навігаційних вод, яка активно просувається у 2023-2024 рр. Йдеться про створення динамічної цифрової моделі морських акваторій з інтеграцією гідрографічних, гідрометеорологічних і навігаційних даних у режимі реального часу. У межах цієї ініціативи запропоновано формування «S-100 Sea Trial Area» для випробування багат шарових S-100-продуктів у реальних умовах експлуатації [40]. Цифровий двійник розглядається як основа майбутньої інтегрованої інформаційної екосистеми, що об'єднує суднові системи, берегові служби та сервіси управління рухом.

Найсвіжіші дослідження 2024-2025 рр. акцентують увагу на інтеграції людського елементу в цифрову навігаційну екосистему. Сучасні наукові роботи [41; 42] поєднують навігаційні параметри з біометричними показниками операторів (втом, когнітивне навантаження, рівень стресу), що дозволяє адаптувати рівень автоматизації та підтримки прийняття рішень у реальному часі. Експериментальні результати свідчать про потенціал таких систем у зниженні ризиків помилок та підвищенні безпеки судноплавства.

Таким чином, сучасний етап розвитку е-Навігації характеризується переходом до інтелектуалізованої, людиноцентричної цифрової екосистеми, де стандарти S-100, цифровий двійник, STM, MCP та системи підтримки рішень функціонують як взаємопов'язані компоненти єдиного інформаційного простору.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що е-Навігація є системоутворювальною складовою сучасної цифрової трансформації морського судноплавства та виступає концептуальною основою інтеграції суднових, берегових і комунікаційних компонентів у єдине інформаційне середовище. Реалізація стратегії, сформованої Міжнародною морською організацією, забезпечує перехід від фрагментованих навігаційних рішень до стандартизованої екосистеми обміну морськими даними.

Автори показали, що впровадження Плану реалізації стратегії е-Навігації та розвиток морських сервісів на основі документів MSC.1/Circ.1595 і MSC.1/Circ.1610/Rev.1 створюють нормативно-організаційний фундамент для гармонізованого цифрового судноплавства. Ключовим технологічним чинником виступає стандарт ІНО S-100, який забезпечує інтероперабельність навігаційних продуктів нового покоління та формує основу інтегрованого середовища S-100 ECDIS.

Проаналізований міжнародний досвід реалізації тестових акваторій і пілотних проєктів (MONALISA 2.0, EfficienSea2, Yangshan Port e-NAV, ESESAME Straits, TICON) підтвердив практичну ефективність гармонізованого обміну маршрутною та гідрографічною інформацією. Отримані результати свідчать про можливість істотного зниження навігаційних ризиків, оптимізації швидкісних режимів, скорочення витрат палива та зменшення екологічного навантаження.

Встановлено, що розвиток безекіпажного судноводіння безпосередньо залежить від рівня впровадження е-Навігації. Автономні та дистанційно керовані судна можуть функціонувати ефективно лише за умови наявності стандартизованої

інфраструктури обміну даними, інтеграції з VTS, використання морських сервісів STM та захищених комунікаційних платформ типу Maritime Connectivity Platform.

Окремо підтверджено, що проблема людського елемента залишається визначальною навіть в умовах автоматизації. Цифровізація не усуває повністю ризики, а трансформує їх характер, що зумовлює необхідність розвитку систем підтримки прийняття рішень, адаптивних інтерфейсів і технологій моніторингу когнітивного навантаження операторів. Перспективним напрямом є інтеграція навігаційних параметрів із біометричними показниками для динамічного налаштування рівня автоматизації.

Таким чином, сучасний етап розвитку е-Навігації характеризується переходом до інтелектуалізованої, людиноцентричної цифрової екосистеми, що поєднує стандарти S-100, цифрові двійники навігаційних вод, системи управління морським трафіком і механізми управління ризиками.

Автори вважають, що подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку методичних підходів до інтеграції багатопланових геопросторових даних у режимі реального часу, удосконалення алгоритмів підтримки рішень та формування нормативної бази для масштабного впровадження автономного судноплавства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Patraiko D. e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – P. 55-60.
2. Pietrzykowski Z. The autonomous navigation system of a sea-going vessel / Z. Pietrzykowski, J. Magaj, P. Wolejsza // *Ocean Engineering*. – 2022. – Vol. 261. – Article 112104. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112104.
3. Burmeister H.C. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective / H.C. Burmeister, W. Bruhn, Ø.J. Rødseth, T. Porathe // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. – 2014. – Vol. 1. – P. 1-13. – DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.002.
4. Porathe T. Autonomous shipping in the context of the 12th COMPIT Conference / T. Porathe, H.-C. Burmeister, Ø.J. Rødseth // *Proceedings of the 12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'13)*, Cortona, 15–17 April 2013. – 2013. – P. 177-183. – ISBN 978-3-89220-663-7.
5. Rødseth Ø.J. A system architecture for an unmanned ship / Ø. J. Rødseth, Å. Tjora // *Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT)*. – 2014. – P. 291-302.
6. Вагущенко Л.Л. Сучасні інформаційні технології в судноводінні : навч. посіб. / Л.Л. Вагущенко. – Одеса: ОНМА, 2013. – 135 с.

7. Ringbom H. Regulating Autonomous Ships – Concepts, Challenges and Precedents / H. Ringbom // *Ocean Development & International Law*. – 2019. – Vol. 50, No. 2–3. – P. 141–169. – DOI: 10.1080/ 00908320.2019.1582593.
8. Томчаковський, Г., Россомаха, О., Оберто Сантана, Л., Саф'ян, О., & Колеснік, О. (2025). Аналіз людського елементу в контексті розвитку морських автономних надводних суден. *Вісник Одеського національного морського університету*, (75), 108-121. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121>.
9. IMO. MSC 100/20/Add.1 Annex 28: Framework for the regulatory scoping exercise [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx> (дата звернення: 15.01.2026).
10. Kystverket. Core objectives [Електронний ресурс]. – URL: <https://kystverket.no/en/About-Kystverket/International-work/enavigation/> (дата звернення: 16.01.2026).
11. IMO. Strategy for the development and implementation of e-navigation : MSC 85/26/Add.1, Annex 20. – London : International Maritime Organization, 2014. – 42 p.
12. IMO. MSC.1/Circ.1595 – E-Navigation Strategy Implementation Plan (SIP), Update 1 (2018) [Електронний ресурс]. – URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/enavigation/MSC.1-Circ.1595-E-Navigation-Strategy-Implementation-Plan-Update-1.pdf> (дата звернення: 17.01.2026).
13. International Maritime Organization. *MSC.1/Circ.1610 – Initial descriptions of maritime services in the context of e-navigation* [Електронний ресурс]. – London: IMO, 2019. – Режим доступу: <https://www.imo.org/> (офіційний розділ e-Navigation) (дата звернення: 20.02.2026).
14. International Maritime Organization. *MSC.1/Circ.1610/Rev.1 – Descriptions of maritime services in the context of e-navigation* [Електронний ресурс]. – London : IMO, 2024. – Режим доступу: <https://www.imo.org/> (офіційний розділ e-Navigation) (дата звернення: 20.02.2026).
15. International Maritime Organization. *MSC.1/Circ.1610/Rev.1 – Descriptions of maritime services in the context of e-navigation* [Електронний ресурс]. – London: IMO, 2024. – Режим доступу: <https://www.imo.org/> (офіційний розділ e-Navigation) (дата звернення: 20.02.2026).
16. International Hydrographic Organization. *S-100 Universal Hydrographic Data Model* [Електронний ресурс]. – Monaco: ІНО. – Режим доступу: <https://iho.int/en/s-100-universal-hydrographic-data-model> (дата звернення: 20.02.2026).
17. Weintrit A. Prioritized main potential solutions for the e-Navigation concept / A. Weintrit // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2013. – Vol. 7, No. 1. – P. 27-38. – DOI: 10.12716/1001.07.01.03.

18. Pillich B. Developing e-Navigation, the early stages [Електронний ресурс] / B. Pillich. – URL: http://ushydro.thsoa.org/hy07/09_01.pdf (дата звернення: 18.01.2026).
19. Ward R. IHO S-100: The New Hydrographic Geospatial Standard for Marine Data and Information / R. Ward, L. Alexander, B. Greenslade, A. Pharaoh // Canadian Hydrographic Conference. – 2008. – Paper No. 425. – P. 1-12.
20. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA). Official website [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.iala.int/> (дата звернення: 19.01.2026).
21. EfficienSea2 Project [Електронний ресурс]. – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/636329> (дата звернення: 20.01.2026).
22. Hojjati-Emami K. The Concept and Methodology for Developing Effective Human Reliability Databanks in Road Transportation / K. Hojjati-Emami, B.S. Dhillon, K. Jenab // International Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 3, No. 2. – P. 45-58.
23. Baldauf M. Improving and Assessing the Impact of e-Navigation Applications / M. Baldauf, S.B. Hong // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. – 2016. – Vol. 4. – P. 1-12. – DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.
24. Россомеха, О., Томчаковский, Г., Россомеха, О., Колесник, О., Саф'ян, О., & Оберто Сантана, Л. (2025). Підводний LiDAR як ключовий компонент інтегрованих систем дослідження океану. Вісник Одеського національного морського університету, (77), 140-164. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-3-140-164>.
25. Development Of An e-Navigation Strategy Implementation Plan. «Report of the Correspondence Group on e-navigation to NAV 59 Submitted by Norway»
26. Jeppesen. e-NAV Concept and Test Beds [Електронний ресурс]. – URL: https://docs.iho.int/mtg_docs/rhc/NIOHC/NIOHC14/NIOHC14-12.4b-e-NAV-Concept-and-Test-Beds-JEPPESEN.pdf (дата звернення: 21.01.2026).
27. Hahn A. Simulation Environment for Risk Assessment of E-Navigation Systems / A. Hahn // Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2015). – 2015. – Paper No. OMAE2015-41498.
28. Imset M. Shared mental models of challenging Maritime Situations: comparisons of ship and shore personnel in the Straits of Malacca and Singapore / M. Imset, K.I. Øvergård // TransNav. – 2013. – Vol. 7, No. 3. – P. 393-398. – DOI: 10.12716/1001.07.03.08.
29. New \$2.15bn automated terminal opened in China's Yangshan Port [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.ship-technology.com/news/new-2-15bn-automated-terminal-opened-chinas-yangshan-port> (дата звернення: 22.01.2026).

30. World's largest automated terminal begins trials [Електронний ресурс]. – URL: <https://psabdp.com/news/world-s-largest-automated-terminal-begins-trials> (дата звернення: 23.01.2026).
31. World Economic Forum. The Digital Transformation of Yangshan Port [Електронний ресурс]. – URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Yangshan_Port_2023.pdf (дата звернення: 24.01.2026).
32. IALA. MONALISA 2.0 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.iala.int/technical/planning-reporting-testbeds-maritime-domain/monalisa-2-0> (дата звернення: 25.01.2026).
33. European Commission. Trans-European Transport Network (TEN-T) [Електронний ресурс]. – URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en (дата звернення: 26.01.2026).
34. Sea Traffic Management (STM) [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.seatrafficmanagement.info/> (дата звернення: 27.01.2026).
35. Maritime Connectivity Platform. Official website. [Електронний ресурс]. – URL: <https://maritimeconnectivity.net/> (дата звернення: 28.01.2026).
36. An overview of the Maritime Cloud – input to IMO e-nav CG [Електронний ресурс]. – URL: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/SNPWG/SNPWG17/SNPWG17-9.3_An_overview_of_the_Maritime_Cloud.pdf (дата звернення: 29.01.2026).
37. International Hydrographic Organization. S-100 Standards in Force [Електронний ресурс]. – URL: <https://iho.int/en/s-100-standards-in-force-0> (дата звернення: 30.01.2026).
38. IHO Member States adopt first set of standards within the S-100 framework [Електронний ресурс]. – URL: <https://safety4sea.com/iho-member-states-adopt-first-set-of-standards-within-the-s-100/6> (дата звернення: 31.01.2026).
39. STM Validation: Cost Benefit Analysis [Електронний ресурс]. – URL: https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20200225092918/STM_ID_5.3.6_STM-VALIDATION-COST-BENEFIT-ANALYSIS-1.pdf (дата звернення: 01.02.2026).
40. International Hydrographic Organization. The Digital Twin of the Navigable Waters: Paving the Way for e-Navigation [Електронний ресурс]. – URL: <https://iho.int/en/the-digital-twin-of-the-navigable-waters-paving-the-way-for-e-navigation> (дата звернення: 05.02.2026).
41. ScienceDirect. Article S235214652500047X [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652500047X> (дата звернення: 10.02.2026).
42. Sensors (MDPI). Article 25(17):5508 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5508> (дата звернення: 13.02.2026).

REFERENCES

1. Patraiko, D., Wake, P., & Weintrit, A. (2009). e-Navigation and the Human Element. In *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (pp. 55-60). Boca Raton: CRC Press. [in English]
2. Pietrzykowski, Z., Magaj, J., & Wolejsza, P. (2022). The autonomous navigation system of a sea-going vessel. *Ocean Engineering*, 261, 112104. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112104> [in English]
3. Burmeister, H.C., Bruhn, W., Rødseth, Ø.J., & Porathe, T. (2014). Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 1, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2014.12.002> [in English]
4. Porathe, T., Burmeister, H.-C., & Rødseth, Ø. J. (2013). Autonomous shipping in the context of the 12th COMPIT Conference. In *Proceedings of the 12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'13)* (pp. 177-183). Cortona. [in English]
5. Rødseth, Ø.J., & Tjora, Å. (2014). A system architecture for an unmanned ship. In *Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT)* (pp. 291-302). [in English]
6. Vahushchenko, L.L. (2013). *Suchasni informatsiini tekhnolohii v sudnovodinni* [Modern information technologies in navigation]. Odesa: ONMA. [in Ukrainian]
7. Ringbom, H. (2019). Regulating Autonomous Ships – Concepts, Challenges and Precedents. *Ocean Development & International Law*, 50(2–3), 141-169. <https://doi.org/10.1080/00908320.2019.1582593> [in English]
8. Tomchakovskiy, H., Rossomakha, O., Oberto Santana, L., Safian, O., & Koliesnik, O. (2025). Analiz liudskoho elementu v konteksti rozvytku morskikh avtonomnykh nadvodnykh suden [Analysis of the human element in the context of maritime autonomous surface ships development]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, 75, 108-121. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121> [in Ukrainian]
9. International Maritime Organization. (2018). MSC 100/20/Add.1 Annex 28: Framework for the regulatory scoping exercise. Retrieved January 15, 2026, from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-100th-session.aspx> [in English]
10. Kystverket. (n.d.). Core objectives. Retrieved January 16, 2026, from <https://kystverket.no/en/About-Kystverket/International-work/enavigation/> [in English]
11. International Maritime Organization. (2014). Strategy for the development and implementation of e-navigation (MSC 85/26/Add.1, Annex 20). London: IMO. [in English]

12. International Maritime Organization. (2018). MSC.1/Circ.1595 – E-Navigation Strategy Implementation Plan (SIP), Update 1. Retrieved January 17, 2026, from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/enavigation/MSC.1-Circ.1595-E-Navigation-Strategy-Implementation-Plan-Update-1.pdf> [in English]
13. International Maritime Organization. (2019). MSC.1/Circ.1610 – Initial descriptions of maritime services in the context of e-navigation. London: IMO. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.imo.org/> [in English]
14. International Maritime Organization. (2024). MSC.1/Circ.1610/Rev.1 – Descriptions of maritime services in the context of e-navigation. London: IMO. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.imo.org/> [in English]
15. International Maritime Organization. (2024). MSC.1/Circ.1610/Rev.1 – Descriptions of maritime services in the context of e-navigation. London: IMO. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.imo.org/> [in English]
16. International Hydrographic Organization. (n.d.). S-100 Universal Hydrographic Data Model. Monaco: IHO. Retrieved February 20, 2026, from <https://iho.int/en/s-100-universal-hydrographic-data-model> [in English]
17. Weintrit, A. (2013). Prioritized main potential solutions for the e-Navigation concept. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(1), 27-38. <https://doi.org/10.12716/1001.07.01.03> [in English]
18. Pillich, B. (n.d.). Developing e-Navigation, the early stages. Retrieved January 18, 2026, from http://ushydro.thsoa.org/hy07/09_01.pdf [in English]
19. Ward, R., Alexander, L., Greenslade, B., & Pharaoh, A. (2008). IHO S-100: The new hydrographic geospatial standard for marine data and information. In *Canadian Hydrographic Conference (Paper 425, pp. 1-12)*. [in English]
20. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (n.d.). Official website. Retrieved January 19, 2026, from <https://www.iala.int/> [in English]
21. EfficienSea2 Project. (n.d.). Retrieved January 20, 2026, from <https://cordis.europa.eu/project/id/636329> [in English]
22. Hojjati-Emami, K., Dhillon, B. S., & Jenab, K. (2012). The concept and methodology for developing effective human reliability databanks in road transportation. *International Journal of Mechanical Engineering*, 3(2), 45-58. [in English]
23. Baldauf, M., & Hong, S. B. (2016). Improving and assessing the impact of e-Navigation applications. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 4, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.001> [in English]
24. Rossomakha, O., Tomchakovskiy, H., Koliesnik, O., Safian, O., & Oberto Santana, L. (2025). Pidvodnyi LiDAR yak kliuchovyi komponent intehrovanykh system doslidzhennia okeanu [Underwater LiDAR as a key component of integrated ocean exploration systems]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, 77, 140-164. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-3-140-164> [in Ukrainian]

25. Norwegian Maritime Authority. (n.d.). Development of an e-Navigation Strategy Implementation Plan: Report of the Correspondence Group on e-navigation to NAV 59 submitted by Norway. [in English]
26. Jeppesen. (n.d.). e-NAV Concept and Test Beds. Retrieved January 21, 2026, from https://docs.iho.int/mtg_docs/rhc/NIOHC/NIOHC14/NIOHC14-12.4b-e-NAV-Concept-and-Test-Beds-JEPPESEN.pdf [in English]
27. Hahn, A. (2015). Simulation environment for risk assessment of e-Navigation systems. In Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2015) (Paper OMAE2015-41498). [in English]
28. Imset, M., & Øvergård, K.I. (2013). Shared mental models of challenging maritime situations: Comparisons of ship and shore personnel in the Straits of Malacca and Singapore. *TransNav*, 7(3), P. 393-398. <https://doi.org/10.12716/1001.07.03.08> [in English]
29. Ship Technology. (n.d.). New \$2.15bn automated terminal opened in China's Yangshan Port. Retrieved January 22, 2026, from <https://www.ship-technology.com/news/new-2-15bn-automated-terminal-opened-chinas-yangshan-por> [in English]
30. PSA International. (n.d.). World's largest automated terminal begins trials. Retrieved January 23, 2026, from <https://psabdp.com/news/world-s-largest-automated-terminal-begins-trials> [in English]
31. World Economic Forum. (2023). The Digital Transformation of Yangshan Port. Retrieved January 24, 2026, from https://www3.weforum.org/docs/WEF_Yangshan_Port_2023.pdf [in English]
32. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (n.d.). MONALISA 2.0. Retrieved January 25, 2026, from <https://www.iala.int/technical/planning-reporting-testbeds-maritime-domain/monalisa-2-0> [in English]
33. European Commission. (n.d.). Trans-European Transport Network (TEN-T). Retrieved January 26, 2026, from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en [in English]
34. Sea Traffic Management. (n.d.). Retrieved January 27, 2026, from <https://www.seatrafficmanagement.info/> [in English]
35. Maritime Connectivity Platform. (n.d.). Official website. Retrieved January 28, 2026, from <https://maritimeconnectivity.net/> [in English]
36. International Hydrographic Organization. (n.d.). An overview of the Maritime Cloud – input to IMO e-nav CG. Retrieved January 29, 2026, from https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/SNPWG/SNPWG17/SNPWG17-9.3_An_overview_of_the_Maritime_Cloud.pdf [in English]
37. International Hydrographic Organization. (n.d.). S-100 standards in force. Retrieved January 30, 2026, from <https://iho.int/en/s-100-standards-in-force-0> [in English]

38. Safety4Sea. (n.d.). IHO member states adopt first set of standards within the S-100 framework. Retrieved January 31, 2026, from <https://safety4sea.com/iho-member-states-adopt-first-set-of-standards-within-the-s-100/> [in English]
39. STM Validation. (2020). Cost benefit analysis. Retrieved February 1, 2026, from https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20200225092918/STM_ID_5.3.6_STM-VALIDATION-COST-BENEFIT-ANALYSIS-1.pdf [in English]
40. International Hydrographic Organization. (n.d.). The digital twin of the navigable waters: Paving the way for e-navigation. Retrieved February 5, 2026, from <https://iho.int/en/the-digital-twin-of-the-navigable-waters-paving-the-way-for-e-navigation> [in English]
41. ScienceDirect. (2025). Article S235214652500047X. Retrieved February 10, 2026, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214652500047X> [in English]
42. Sensors (MDPI). (2025). Article 25(17):5508. Retrieved February 13, 2026, from <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5508> [in English]

Дата надходження статті: 19.05.2026

Дата прийняття статті: 24.05.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026