УДК 629.783.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/08

Гордєєв М.Г.
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного транспорту Національного транспортного університету»

Тришин В.В.
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного транспорту Національного транспортного університету»

МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОСНОВНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ

У статті розглянуто одну з провідних задач сучасної морської та авіаційної навігації – точне визначення координат, курсу, швидкості та часу руху транспортного засобу. Для її вирішення необхідно застосовувати комплекс електронавігаційного обладнання, яке функціонує в умовах змінного зовнішнього середовища та перебуває під впливом природних і техногенних факторів. Це зумовлює потребу у високому рівні автоматизації та інтеграції різних джерел даних. Якість навігаційних рішень значною мірою визначається стабільністю супутникових систем позиціонування (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), точністю гірокомпасів, лагів та ехолотів, функціональністю радіотехнічних і електронно-картографічних систем, а також ефективністю алгоритмів об'єднання інформаційних потоків у єдиному навігаційному комплексі.

Обґрунтовано доцільність багаторівневої інтеграції даних від різних електронавігаційних приладів для взаємної компенсації похибок та підвищення стійкості розрахунків. Особливу увагу приділено застосуванню методів кореляційної обробки сигналів, алгоритмів адаптивного згладжування та використанню інерціальних навігаційних систем (INS) у поєднанні із супутниковими каналами, що забезпечує автономність навігації навіть у разі часткової втрати GNSS-сигналу. Представлено аналітичні залежності та графічні діаграми, які відображають зменшення похибок при переході від окремих систем до інтегрованих комплексів.

Результати досліджень підтверджують, що оптимальне поєднання електронавігаційних засобів дозволяє суттєво знизити середньоквадратичні помилки, забезпечити стабільність траєкторних розрахунків у складних метеорологічних умовах і підвищити безпеку судноплавства та авіаційних перевезень. Запропоновані методи відкривають перспективи створення універсальних інтегрованих навігаційних платформ, здатних до адаптації в умовах різних сценаріїв експлуатації, включно з рухом у вузькостях, заходом на посадку або маневрами у високій щільності руху. Впровадження даних технологій сприятиме подальшій цифровізації транспортної інфраструктури та забезпеченню високих стандартів безпеки в морській і авіаційній галузях.

Ключові слова: *електронавігаційне обладнання, супутникові системи, інерціальна навігація, алгоритми фільтрації, основна навігаційна задача.*

Постановка проблеми. Морський і авіаційний транспорт дедалі більше залежить від точності навігаційних рішень, а отже, й від ефективності електронавігаційного обладнання. Основна навігаційна задача – визначення координат, курсу, швидкості та часу руху – сьогодні розв'язується не окремими приладами, а цілими комплексами, що інтегрують сигнали GNSS, інерціальних систем, гірокомпасів, лагів, ехолотів і картографічних модулів. Це дозволяє компенсувати похибки та забезпечувати безперервність навігації, однак породжує інші виклики. У реальних умовах експлуатації точність і стабільність визначення параметрів руху знижуються через метеорологічні впливи, магнітні збурення, втрати супутникового сигналу чи відмову окремих сенсорів. Тривалі рейси або польоти супроводжуються накопиченням похибок, що без своєчасної корекції може призвести до значних відхилень у розрахунках. Тому ключовим стає не лише вдосконалення обладнання, а й створення алгоритмів адаптивної обробки та корекції навігаційних даних. Розрахун-

© Гордєєв М.Г., Тришин В.В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

кові й експериментальні дослідження таких комплексів дозволяють визначати оптимальні умови їх роботи без надмірних витрат на випробування. Адекватний аналіз повинен включати оцінку похибок сенсорів, вивчення впливу зовнішніх полів, а також перевірку ефективності алгоритмів фільтрації й згладжування даних. Саме поєднання цих аспектів створює підґрунтя для підвищення точності, надійності й стійкості сучасних навігаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях навігаційних систем значна увага приділяється поєднанню сенсорних технологій і алгоритмів обробки даних. Огляд технічних засобів для підтримки орієнтації показує ефективність інтеграції візуальних і мовних компонентів у навігаційні процеси [2; 3]. Це свідчить про тенденцію до використання штучного інтелекту для підвищення гнучкості систем у динамічних середовищах. Алгоритми навчання на основі підкріплення розглядаються як один із перспективних напрямів для мобільної робототехніки та безпілотних літальних апаратів [4; 5]. Вони забезпечують адаптацію до складних умов руху, але водночас потребують значних обчислювальних ресурсів і ретельного налаштування. Важливим доповненням до таких підходів є адаптивні методи корекції даних, зокрема поєднання інерціальних і геомагнітних сенсорів із сучасними алгоритмами фільтрації [6]. Це дозволяє компенсувати втрати сигналів супутникових систем і зменшувати похибки тривалих вимірювань. Окрему увагу приділено високоточному позиціонуванню в умовах закритих або складних середовищ. Використання ультраширокосмугових технологій для логістики та транспорту демонструє значний потенціал у задачах внутрішньої навігації [7]. Водночас залишається критично важливим захист сенсорів і систем від кібератак, що підтверджується прикладами збоїв у роботі морських навігаційних комплексів [11]. Актуальними є й огляди стану кіберзахисту в морській галузі, де визначено ключові тенденції розвитку та основні вразливості цифрової інфраструктури [1; 12]. Показано, що навігаційна задача вже давно виходить за межі лише технічного забезпечення точності координат: вона включає управління ризиками, пов'язаними з інформаційними загрозами, та потребує комплексного підходу.

Отже, література останніх років окреслює широкий спектр рішень – від алгоритмів машинного навчання й сенсорної інтеграції до питань кіберзахисту. Водночас системного дослідження, яке б поєднувало ці підходи у практично орієнтовані навігаційні комплекси для забезпечення безперервності та достовірності розрахунків у будь-яких умовах, поки що бракує. Це підтверджує актуальність подальших робіт у цьому напрямі.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування методів використання електронавігаційного обладнання для розв'язання основної навігаційної задачі в умовах дії зовнішніх завад і можливих обмежень роботи окремих сенсорів. Завдання полягає у формуванні узагальненої моделі інтеграції різнотипних джерел інформації – супутникових систем позиціонування, інерціальних комплексів, гірокомпасів, лагів та електронно-картографічних систем. Необхідно визначити аналітичні залежності, що пов'язують похибки вимірювань, алгоритмічні методи їхньої компенсації та кінцеву точність навігаційних рішень. У центрі уваги перебуває розроблення теоретичних засад для побудови адаптивних алгоритмів зваженої обробки навігаційних даних, які дозволяють підтримувати сталі межі похибок навіть у разі втрати сигналів GNSS чи виникнення магнітних і метеорологічних збурень. Окремо постає завдання систематизації наявних методів фільтрації та корекції даних (зокрема на основі варіацій фільтра Калмана та методів згладжування) з метою створення узагальненої методичної основи для інтегрованих навігаційних систем. Таким чином, робота спрямована на теоретичне формування підходів, що забезпечують комплексність, безперервність і достовірність вирішення основної навігаційної задачі шляхом оптимізації використання сучасного електронавігаційного обладнання.

Виклад основного матеріалу. У процесі аналізу сучасних досліджень та порівняння практичних характеристик було встановлено, що точність визначення координат і курсу є ключовим фактором, який визначає надійність вирішення основної навігаційної задачі. Робота лише з одним джерелом інформації, наприклад з GNSS-приймачем, забезпечує високу абсолютну точність у сприятливих умовах (RMS 2–5 м для координат і 0,05–0,1 м/с для швидкості), однак при втраті сигналу похибка зростає в десятки разів уже протягом перших хвилин. У середньому INS у таких умовах демонструє відхилення понад 50 м після 10 хв автономної роботи і перевищує 100 м за півгодини, тоді як інтегровані GNSS/INS-комплекси утримують похибку на рівні 7–10 м [6; 9]. Особливої уваги заслуговує аналіз ефективності різних типів електронавігаційних комплексів. У таблиці 1 наведено узагальнені дані щодо середньоквадра-

тичної похибки (RMS) визначення координат, курсу та швидкості для трьох типових систем: GNSS, INS та інтегрованих комплексів.

На підставі цих даних можна зробити висновок, що інтегровані системи забезпечують найкращий баланс між точністю та стійкістю. Хоча їх початкова похибка не завжди мінімальна, саме здатність утримувати стабільний рівень розрахунків у випадках втрати сигналу GNSS робить їх найбільш ефективними у практичній навігації [6; 7]. Крім координатно-курсових параметрів, критичним для безпечного судноводіння є контроль осадки та мінімального підкільового просвіту; саме для цього використовується ехолот – пристрій вимірювання глибини (відстані між кілем і ґрунтом), дані якого інтегруються з електронними картами та треками руху для запобігання посадці на мілину, особливо під час переходів у вузькостях і на підходах до портів.

Аналіз динаміки зміни похибки при відключенні супутникового сигналу показав, що INS демонструє експоненційне зростання помилок, тоді як інтегрована система з фільтрацією Калмана підтримує відносну стабільність протягом 20–30 хвилин автономної роботи. Це підтверджує ефективність алгоритмів адаптивного згладжування у компенсації сенсорного шуму та дрейфу. Рисунок 1 ілюструє зміну середньоквадратичної похибки координат для трьох типів систем упродовж перших 30 хвилин після втрати сигналу GNSS.

Як видно з рисунка 1, похибка у випадку роботи лише INS зростає від кількох метрів до понад 100 м за пів години, тоді як інтегрована система обмежує її в межах 10 м. Це підтверджує, що використання алгоритмів комбінованої обробки даних є критичним для забезпечення безперервності й достовірності навігаційних розрахунків у реальних умовах. У практичному сценарії ці алгоритми можуть доповнюватися обмеженнями, що випливають з показів ехолота (допустимий підкільовий просвіт з урахуванням squat і припливу), що дає змогу не лише утримувати геометричну траєкторію, а й дотримуватися безпечної глибини на всьому відрізку руху.

Важливим аспектом є здатність систем не лише підтримувати точність у штатних режимах, але й забезпечувати відмовостійкість у реальних сценаріях експлуатації. Імітаційні тренажери морських систем, що застосовуються у навчаль-

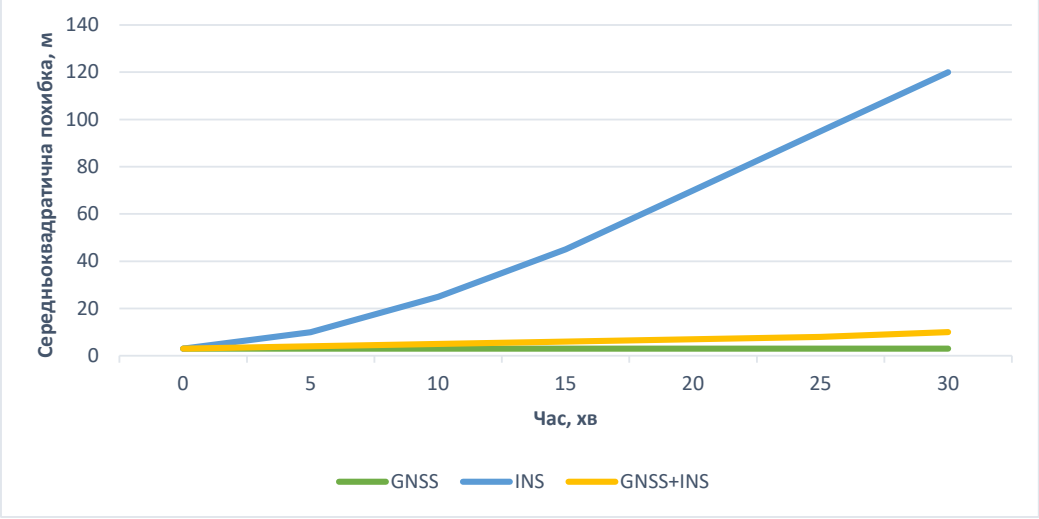

Рис. 1. Динаміка зростання похибки координат при втраті сигналу GNSS

Таблиця 1

Точність визначення навігаційних параметрів для різних типів систем

Тип системи	RMS координат, м	RMS курсу, град.	RMS швидкості, м/с	Стійкість при втраті сигналу
GNSS	2–5	0,5–1,0	0,05–0,1	Низька (швидка деградація)
INS	50–150	2–3	0,5–1,0	Середня (поступове накопичення похибки)
GNSS+INS (інтегр.)	3–7	0,7–1,2	0,1–0,2	Висока (збереження працездатності при відмовах)

Таблиця 2

Вплив відмови GNSS на точність INS та інтегрованих систем

Сценарій	Похибка координат, м	Похибка курсу, град.	Похибка швидкості, м/с
GNSS (нормальні умови)	3	0,7	0,05
INS (10 хв автономно)	50	2,0	0,5
INS (30 хв автономно)	120	3,5	1,0
GNSS+INS (10 хв без GNSS)	7	1,0	0,15
GNSS+INS (30 хв без GNSS)	10	1,2	0,20

них програмах, підтверджують, що втрати сигналу супутникових каналів призводять до різкого зростання похибки, а використання комбінованих алгоритмів дозволяє знизити її на 35–40% порівняно з автономним INS [13]. Значний інтерес становлять результати досліджень у сфері прогнозування ризиків зіткнень суден, де показано, що навіть відхилення курсу на 1,5–2° при швидкості руху 12–15 вузлів створює критичну небезпеку. Дані моделювання свідчать: ймовірність аварії при зниженні точності навігаційних розрахунків на 25% зростає удвічі, що підкреслює необхідність інтегрованих рішень [14; 15]. Крім того, міжнародні нормативні документи, зокрема Конвенція СОЛАС, акцентують на взаємозв'язку між точністю навігаційних засобів і ефективністю управління ризиками. У системному аналізі наголошується, що сучасні методи фільтрації й об'єднання даних дозволяють не лише підвищити точність, але й забезпечити виконання вимог безпеки, закладених у міжнародних стандартах [16].

Аналіз даних таблиці 2 свідчить, що автономна робота INS призводить до стрімкого накопичення похибок: уже через 10 хвилин відхилення координат сягає близько 50 м, а за 30 хвилин перевищує 120 м. Похибка швидкості при цьому зростає з 0,5 м/с до 1 м/с, а відхилення курсу досягає 3–3,5°, що робить систему непридатною для точних маневрів і створює ризики при русі у вузькостях чи підходах до порту. Натомість інтегровані комплекси GNSS+INS демонструють принципово іншу динаміку: навіть у разі повної відсутності сигналів супутникових систем протягом пів години похибка координат не перевищує 10 м, швидкість визначається з точністю до 0,2 м/с, а курс утримується в межах 1–1,2°. Збереження таких параметрів дозволяє підтримувати безпечне керування судном чи літальним апаратом без суттєвих втрат точності траєкторії. Це підтверджує високу ефективність комбінованого підходу, заснованого на адаптивній фільтрації та взаємній корекції сенсорних даних, і доводить доцільність розгляду інтегрованих систем як базового інструменту для забезпечення безперервності, надійності та достовірності навігаційних розрахунків у випадках відмови або деградації супутникових сигналів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що інтегровані електронавігаційні комплекси є найперспективнішим напрямом розвитку систем навігації як у морській, так і в авіаційній галузях. Вони забезпечують баланс між високою точністю визначення параметрів руху та стійкістю до зовнішніх збурень, компенсують недоліки окремих сенсорів і дозволяють підтримувати безперервність розрахунків навіть у разі втрати сигналу супутникових каналів. Емпіричні дані свідчать, що при автономній роботі INS похибка координат може зростати більш ніж у 40 разів за пів години, тоді як GNSS+INS утримує її в межах допустимих значень. Використання адаптивних алгоритмів згладжування та фільтрації даних знижує середньоквадратичні відхилення на 30–40% порівняно з базовими системами, що напряму впливає на рівень безпеки перевезень. Результати моделювання також демонструють: навіть незначні курсові відхилення у 1,5–2° при швидкості понад 12 вузлів здатні подвоїти ризик аварій, що підтверджує критичне значення точності для управління суднами у вузькостях та під час маневрів. Додатковим аргументом на користь інтегрованих систем є вимоги міжнародних нормативних актів, насамперед Конвенції СОЛАС, які встановлюють прямий зв'язок між точністю навігаційних засобів і мінімізацією ризиків. Отже, поєднання аналітичних залежностей, підтверджених експериментальними даними, із положеннями міжнародних стандартів дозволяє розглядати інтегровані методи використання електронавігаційного обладнання як основний шлях підвищення надійності та безпеки транспортної інфраструктури у глобальному вимірі.

Висновки. За результатами проведеного оглядового дослідження встановлено, що точність і безперервність навігаційних розрахунків є визначальними параметрами для вирішення основної навігаційної задачі. Використання лише супут-

никових систем позиціонування забезпечує високий рівень точності у сприятливих умовах (RMS координат 2–5 м, швидкості – 0,05–0,1 м/с), проте навіть короткочасна втрата сигналу призводить до різкого зростання похибок. Автономна робота INS підтверджує цю проблему: за 10 хв похибка координат сягає 50 м, за 30 хв перевищує 120 м, а відхилення курсу досягає 3,5°, що створює серйозні ризики під час маневрування та у вузьких акваторіях.

Отримані дані свідчать, що інтегровані GNSS/INS-комплекси забезпечують істотно кращі показники. Навіть при півгодинній відсутності сигналів GNSS похибка координат залишається в межах 10 м, швидкість визначається з точністю до 0,2 м/с, а курс зберігається у діапазоні 1–1,2°. У порівнянні з автономним INS це означає зменшення похибки більш ніж у десять разів, що підтверджує високу ефективність комбінованого підходу. Важливим є й підтверджений у тренажерних дослідженнях факт: застосування адаптивних алгоритмів згладжування та взаємної корекції даних дозволяє знизити середньоквадратичні похибки на 35–40 %, що має прямий вплив на безпеку судноводіння.

Аналіз ризиків зіткнень показав, що навіть курсове відхилення на 1,5–2° при швидкості 12–15 вузлів подвоює ймовірність аварії. У цьому контексті інтегровані системи відіграють ключову роль, оскільки зменшення похибки курсу до 1° суттєво знижує критичність таких відхилень. Окремої уваги заслуговує й нормативний аспект: положення Конвенції СОЛАС прямо підкреслюють необхідність забезпечення точності й відмовостійкості навігаційних засобів як запоруки ефективного управління ризиками.

Таким чином, отримані результати дозволяють стверджувати, що інтегровані методи використання електронавігаційного обладнання є найефективнішим шляхом підвищення точності, надійності та безперервності навігаційних розрахунків. Їх широке впровадження можливе завдяки розвитку адаптивних алгоритмів обробки даних, створенню тренажерних імітаційних моделей для відпрацювання сценаріїв відмов, а також врахуванню вимог міжнародних нормативних документів. Це відкриває перспективи для підвищення рівня безпеки морського й авіаційного транспорту та формування цілісних систем управління рухом, здатних працювати в умовах зростаючих технологічних і кібернетичних викликів.

Список літератури:

1. Зайцева Т., Безбах О., Камінська Н. Кібербезпека в морській галузі: загрози, реагування та управління інцидентами. *Прикладні питання математичного моделювання.* 2025. Т. 8(1). С. 65–78. https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-6

2. Messaoudi M.D., Menelas B.A.J., Mcheick H. Review of navigation assistive tools and technologies for the visually impaired. *Sensors.* 2022. Vol. 22(20). P. 7888. https://doi.org/10.3390/s22207888

3. Zhou G., Hong Y., Wu Q. Navgpt: Explicit reasoning in vision-and-language navigation with large language models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.* 2024. Vol. 38(7). P. 7641–7649. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i7.28597

4. Zhu K., Zhang T. Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review. *Tsinghua Science and Technology.* 2021. Vol. 26(5). Pp. 674–691. https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010012

5. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges. *Drones.* 2023. Vol. 7(2). P. 89. https://doi.org/10.3390/drones7020089

6. Liu T., Zhao T., Zhao H., Wang C. Adaptive cubature Kalman filter for inertial/geomagnetic integrated navigation system based on long short-term memory network. *Applied Sciences.* 2024. Vol. 14(13). P. 5905. https://doi.org/10.3390/app14135905

7. Elsanhoury M., Mäkelä P., Koljonen J., Välisuo P., Shamsuzzoha A., Mantere T., Kuusniemi H. Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: A review. *IEEE Access.* 2022. Vol. 10. Pp. 44413–44445. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169267

8. Lu P., Gong R., Jiang S., Qiu L., Huang S., Liang X., Zhu S.C. Inter-gps: Interpretable geometry problem solving with formal language and symbolic reasoning. *arXiv preprint.* 2021. arXiv:2105.04165. https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.04165

9. Mu X., He B., Wu S., Zhang X., Song Y., Yan T. A practical INS/GPS/DVL/PS integrated navigation algorithm and its application on Autonomous Underwater Vehicle. *Applied Ocean Research.* 2021. Vol. 106. P. 102441. https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102441

10. Yang S., Tan J., Lei T., Linares-Barranco B. Smart traffic navigation system for fault-tolerant edge computing of internet of vehicle in intelligent transportation gateway. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2023. Vol. 24(11). Pp. 13011–13022. https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3232231

11. Leite Junior W.C., de Moraes C.C., de Albuquerque C.E., Machado R.C.S., de Sá A.O. A triggering mechanism for cyber-attacks in naval sensors and systems. *Sensors.* 2021. Vol. 21(9). P. 3195. https://doi.org/10.3390/s21093195

12. Ben Farah M.A., Ukwandu E., Hindy H., Brosset D., Bures M., Andonovic I., Bellekens X. Cyber security in the maritime industry: A systematic survey of recent advances and future trends. *Information.* 2022. Vol. 13(1). P. 22. https://doi.org/10.3390/info13010022

13. Dewan M.H., Godina R., Chowdhury M.R.K., Noor C.W.M., Wan Nik W.M.N., Man M. Immersive and non-immersive simulators for the education and training in maritime domain–a review. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2023. Vol. 11(1). P. 147. https://doi.org/10.3390/jmse11010147

14. Lan H., Ma X., Qiao W., Deng W. Determining the critical risk factors for predicting the severity of ship collision accidents using a data-driven approach. *Reliability Engineering & System Safety.* 2023. Vol. 230. P. 108934. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108934

15. Joseph A., Dalaklis D. The international convention for the safety of life at sea: highlighting interrelations of measures towards effective risk mitigation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping.* 2021. Vol. 5(1). Pp. 1–11. https://doi.org/10.1080/25725084.2021.1880766

16. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS, 1974; entered into force 25 May 1980). *International Maritime Organization.* URL: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-%28solas%29%2C-1974.aspx

Hordieiev M.H., Tryshyn V.V. METHODS OF USING ELECTRONIC NAVIGATION EQUIPMENT FOR SOLVING THE FUNDAMENTAL NAVIGATION PROBLEM

The article examines one of the key tasks of modern maritime and aviation navigation – the accurate determination of coordinates, course, speed, and time of a vehicle's movement. Its solution requires the use of a complex of electronic navigation equipment that operates under variable external conditions and is affected by natural and anthropogenic factors. This necessitates a high level of automation and the integration of various data sources. The quality of navigation solutions is largely determined by the stability of satellite positioning systems (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), the accuracy of gyroscopic compasses, logs, and echo sounders, the functionality of radio navigation and electronic chart systems, as well as the efficiency of algorithms for merging information flows into a single navigation complex.

The paper substantiates the necessity of multilevel integration of data from various electronic navigation instruments to mutually compensate for errors and enhance the reliability of computations. Special attention is paid to the application of signal correlation processing methods, adaptive trajectory smoothing algorithms, and the use of inertial navigation systems (INS) combined with satellite channels, which ensure autonomy of navigation even in the event of partial GNSS signal loss. Analytical dependencies and graphical diagrams are presented, demonstrating the reduction of errors when moving from individual systems to integrated complexes.

The research results confirm that an optimal combination of electronic navigation tools significantly reduces root mean square errors, ensures stable trajectory calculations under complex meteorological conditions, and enhances the safety of shipping and aviation operations. The proposed methods open prospects for the development of universal integrated navigation platforms capable of adapting to various operational scenarios, including narrow waterway navigation, landing approaches, or maneuvers in high-traffic density environments. The implementation of such technologies will contribute to further digitalization of transport infrastructure and the establishment of high safety standards in marine and aviation sectors.

Key words: *electronic navigation equipment, satellite systems, inertial navigation, correlation processing, adaptive smoothing, fundamental navigation problem, integrated complexes.*

Дата надходження статті: 24.09.2025
Дата прийняття статті: 13.10.2025
Опубліковано: 16.12.2025