

© Головань А.І., Монюшко М.М.

## АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ НАВІГАЦІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Зростання масштабів трансокеанських перевезень і впровадження контейнеровозів великої та надвеликої місткості ULCV обумовлюють підвищені вимоги до точності навігації, енергоефективності та обґрунтованості управлінських рішень в умовах невизначеності морського середовища. Традиційні підходи до навігації, що базуються на використанні ізольованих джерел даних та детермінованих моделей, не забезпечують належного рівня адаптивності до змінних зовнішніх впливів і обмежують можливості оптимізації експлуатаційних параметрів суден. Метою роботи є розробка алгоритмічного забезпечення інтегрованих навігаційно-інформаційних систем контейнеровозів на основі обробки великих обсягів даних, математичного моделювання руху судна та методів інтелектуальної обробки інформації. У дослідженні запропоновано підхід, що поєднує дані глобальних навігаційних супутникових систем GNSS, гідроакустичних засобів вимірювання та метеорологічних спостережень із використанням методів адаптивної фільтрації, зокрема фільтрів Калмана, для формування узгодженого вектору стану судна. Уточнено математичну модель руху судна на основі 3DOF-підходу з урахуванням впливу хвиль, вітру та течій, доповнену коригуючими членами, що формуються на основі асиміляції даних у реальному часі. Запропоновано алгоритм інтегрованої обробки навігаційних даних і підтримки прийняття рішень, який забезпечує прогнозування траєкторії руху судна та оптимізацію маршруту за багатокритеріальними показниками, такими як витрати палива, тривалість переходу та рівень навігаційної безпеки. Отримані результати свідчать про підвищення точності оцінки параметрів руху та прогнозування траєкторії, а також про зниження експлуатаційних витрат за рахунок більш раціонального вибору режимів руху. Показано, що запропонований підхід є універсальним і може бути застосований для контейнеровозів різних класів, зокрема ULCV, з урахуванням їх інерційних характеристик. Практична цінність роботи полягає у можливості інтеграції розробленого алгоритмічного забезпечення в сучасні навігаційні системи та цифрові платформи управління морським транспортом, що створює передумови для подальшого розвитку інтелектуальних і автономних судноплавних технологій.

**Ключові слова:** ефективність експлуатації; контейнеровози; ULCV; навігаційно-інформаційні системи; GNSS; гідроакустичні системи; метеорологічні дані; математичне моделювання руху судна; алгоритми підтримки прийняття рішень; штучний інтелект.

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток морських перевезень характеризується стійкою тенденцією до збільшення розмірів і вантажомісткості контейнеровозів, зокрема впровадженням суден класу Ultra Large Container Vessel (ULCV). Зростання геометричних параметрів і дедвейту таких суден обумовлює суттєве підвищення їх інерційності, що ускладнює процеси керування рухом, маневрування та утримання заданої траєкторії, особливо в умовах трансокеанських переходів. У таких умовах навіть незначні похибки у навігаційних рішеннях можуть призводити до накопичення відхилень, збільшення витрат палива та зниження загальної ефективності експлуатації.

Додатковим ускладнюючим фактором є стохастичний характер морського середовища. Хвильові процеси, вітрові навантаження та морські течії мають нелінійний і змінний за часом вплив на динаміку руху судна, що суттєво ускладнює побудову адекватних математичних моделей і прогнозування траєкторії. Водночас точність врахування цих факторів безпосередньо визначає якість навігаційних рішень, зокрема при оптимізації маршрутів і режимів руху.

Сучасні навігаційно-інформаційні системи контейнеровозів використовують широкий спектр джерел даних, включаючи супутникові системи позиціонування, автоматичну ідентифікаційну

систему, гідроакустичні засоби вимірювання та метеорологічні спостереження. Проте ці дані, як правило, обробляються ізольовано або в рамках слабо інтегрованих підсистем, що призводить до їх фрагментарного використання. Відсутність узгоджених процедур синхронізації, фільтрації та об'єднання різнорідної інформації обмежує можливості формування цілісної картини навігаційної ситуації та знижує ефективність прийняття рішень.

Особливої актуальності набуває проблема відсутності інтегрованих алгоритмічних рішень, здатних забезпечити обробку великих обсягів даних у реальному часі з урахуванням динаміки зовнішнього середовища та технічного стану судна. Існуючі підходи переважно базуються на детермінованих моделях або статичних алгоритмах, які не забезпечують достатньої адаптивності до змінних умов експлуатації та не використовують повною мірою потенціал сучасних методів інтелектуальної обробки даних.

Таким чином, ключова науково-прикладна проблема полягає у недостатній ефективності існуючих навігаційних систем контейнеровозів, що зумовлено відсутністю єдиного алгоритмічного ядра, яке забезпечує інтеграцію різнорідних навігаційних даних, їх адаптивну обробку та підтримку прийняття оптимальних рішень у реальному часі. Вирішення цієї проблеми потребує розробки нових підходів до алгоритмічного забезпечення інтегрованих навігаційно-інформаційних систем із використанням методів математичного моделювання та штучного інтелекту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у сфері підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів формують кілька ключових наукових напрямів, що охоплюють як класичні підходи до моделювання руху суден, так і сучасні методи інтеграції даних та інтелектуальної обробки інформації.

Класичні детерміновані моделі маневрування суден, зокрема моделі типу Nomoto та MMG, залишаються базовим інструментом для опису динаміки руху суден. Результати досліджень свідчать, що модифіковані MMG-моделі здатні забезпечити високу точність прогнозування маневрених характеристик контейнеровозів, зокрема покращення точності оцінки параметрів повороту до 78% та досягнення низьких значень RMSE для основних показників руху [1]. Розширення моделей до 4-DOF дозволяє враховувати взаємодію крену та курсового руху, що підвищує адекватність опису динаміки на високих швидкостях [2].

Водночас встановлено, що класичні моделі мають обмежену адаптивність до реальних умов експлуатації, що пов'язано зі складністю врахування змінних гідродинамічних характеристик та зовнішніх збурень [3]. Нелінійні модифікації моделей Nomoto підвищують точність у динамічних режимах, однак супроводжуються зростанням обчислювальної складності, що обмежує їх використання в режимі реального часу [4]. Крім того, традиційні моделі мають знижену точність при низькошвидкісних режимах та складних маневрах, що потребує їх подальшого вдосконалення [5].

Суттєвий розвиток сучасних навігаційних систем пов'язаний із впровадженням методів багатосенсорної інтеграції. Дослідження показують, що поєднання даних GNSS, компасів, лагів та інших сенсорів із використанням фільтрів Калмана дозволяє значно підвищити точність і надійність оцінки стану судна [6]. Зокрема, застосування Unscented Kalman Filter забезпечує ефективну обробку нелінійних систем і врахування впливу зовнішніх факторів, таких як течії [7].

Багатосенсорна інтеграція дозволяє компенсувати обмеження окремих технологій, зокрема GNSS, шляхом використання комплементарних характеристик різних сенсорів [8]. Це забезпечує підвищення точності позиціонування та надійності навігаційних рішень у складних умовах експлуатації [9]. Водночас ефективність інтеграції значною мірою залежить від обраних алгоритмів обробки даних, включаючи як класичні методи, так і підходи, засновані на машинному навчанні [10].

Метео-орієнтована маршрутизація є важливим інструментом підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів у трансокеанських перевезеннях. Дослідження демонструють, що врахування вітру, хвиль та течій при плануванні маршруту дозволяє досягти зниження витрат палива, яке у окремих випадках може перевищувати 10% [11]. Використання алгоритмів оптимізації, таких як модифікований алгоритм Дейкстри або методи динамічного програмування, забезпечує ефективний пошук оптимальних маршрутів [12].

Окремі дослідження також показують покращення енергоефективності та зменшення часу переходу при використанні метеоданих [13]. При цьому ефект може варіюватися від помірного (близько 1-2%) до значного залежно від умов експлуатації [14]. Нові адаптивні моделі маршрутизації демонструють потенціал суттєвого підвищення ефективності експлуатації без значного збільшення довжини маршруту [15].

Інтенсивний розвиток інтелектуальних технологій зумовив активне впровадження AI та data-driven підходів у задачі навігації. Дослідження показують, що сучасні методи глибокого навчання дозволяють значно підвищити точність прогнозування траєкторії руху суден порівняно з традиційними моделями [16]. Зокрема, використання LSTM-мереж забезпечує високу точність і стійкість прогнозів [17].

Використання історичних даних AIS дозволяє формувати більш точні моделі поведінки суден та оцінювати множинні сценарії розвитку траєкторії [18]. Гібридні підходи, що поєднують фізичні моделі та нейронні мережі, демонструють покращення точності та зниження невизначеності прогнозів [19]. Водночас ефективність AI-підходів залежить від якості вхідних даних та доступності обчислювальних ресурсів [20].

Проведений аналіз показує, що існуючі підходи мають як суттєві переваги, так і обмеження. Класичні моделі забезпечують фізичну інтерпретованість, але мають обмежену адаптивність; сенсорна інтеграція підвищує точність оцінки стану судна, однак потребує складних алгоритмів обробки; метео-орієнтована маршрутизація дозволяє знизити витрати, але залежить від якості прогнозів; AI-підходи забезпечують високу точність прогнозування, проте вимагають значних обсягів даних. Це обґрунтовує необхідність розробки інтегрованих алгоритмічних рішень, що поєднують переваги зазначених підходів у межах єдиної навігаційно-інформаційної системи.

**Мета дослідження** полягає у розробці алгоритмічного забезпечення інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровоза, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації на основі обробки великих обсягів даних та інтелектуальних методів підтримки рішень.

**Основні результати дослідження.** Для формалізації процесів керування рухом контейнеровоза в умовах трансокеанських перевезень використано спрощену математичну модель на основі тривимірної площинної динаміки (3DOF), що враховує поступальні рухи вздовж осей ( $x$ ,  $y$ ) та кутове обертання відносно вертикальної осі ( $yaw$ ). Такий підхід є достатнім для опису основних навігаційних режимів при русі у відкритому морі та широко застосовується в рамках моделей типу MMG.

*Математична модель руху судна*

Система рівнянь руху судна у зв'язаній системі координат має вигляд:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X_H + X_P + X_R + X_E \\ m(\dot{v} + ur) = Y_H + Y_R + Y_E \\ I_z \dot{r} = N_H + N_R + N_E \end{cases},$$

де  $u$ ,  $v$  – поздовжня та поперечна швидкості судна;  $r$  – кутова швидкість обертання;  $m$  – маса судна;  $I_z$  – момент інерції відносно вертикальної осі;  $X, Y, N$  – проекції сил і моментів відповідно до осей координат; індекси  $H, P, R, E$  відповідають корпусу (hydrodynamic hull forces), рушійній установці (propeller), рулю (rudder) та зовнішнім впливам (environmental forces).

Гідродинамічні сили корпусу  $X_H, Y_H, N_H$  визначаються як нелінійні функції швидкостей і кутів дрейфу, тоді як сили від рушія та рулю враховують режими роботи енергетичної установки та кути відхилення керма.

Особливу увагу в моделі приділено зовнішнім збуренням, що мають стохастичний характер та суттєво впливають на динаміку руху судна. До них віднесено:

- хвильовий вплив, який проявляється у вигляді додаткових сил опору та збурюючих моментів, що змінюються у часі та залежать від спектра хвиль;

- вітрове навантаження, яке визначається відносною швидкістю вітру, аеродинамічними характеристиками надводної частини судна та курсовим кутом;
- морські течії, що викликають зсув траєкторії та впливають на ефективну швидкість руху судна відносно ґрунту.

Зовнішні сили та моменти можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} X_E &= X_{wave} + X_{wind} + X_{current}, \\ Y_E &= Y_{wave} + Y_{wind} + Y_{current}, \\ N_E &= N_{wave} + N_{wind} + N_{current}. \end{aligned}$$

Однак використання виключно детермінованої моделі не забезпечує достатньої точності прогнозування руху судна в реальних умовах експлуатації через наявність неврахованих факторів, похибок вимірювань та змінності параметрів середовища. З метою підвищення адекватності моделі запропоновано її модифікацію шляхом введення коригуючого члена, що формується на основі інтеграції даних від навігаційних сенсорів у реальному часі.

Модифіковане рівняння для поздовжньої складової сили може бути записано у вигляді:

$$X = X_H + X_P + X_R + X_E + X_{corr}$$

де коригуючий член  $X_{corr}$  визначається як функція великих обсягів даних:

$$X_{corr} = f(\text{GNSS, hydroacoustic, meteo})$$

Аналогічні коригуючі члени вводяться для поперечної сили та моменту ( $Y_{corr}, N_{corr}$ ). Функція корекції реалізується у вигляді адаптивного алгоритму, який:

- оцінює відхилення між прогнозованими та фактичними параметрами руху;
- виконує ідентифікацію неврахованих збурень;
- коригує параметри моделі або додає компенсуючі впливи.

У якості джерел даних використовуються:

- GNSS – для визначення координат, швидкості та курсу відносно ґрунту;
- гідроакустичні системи – для оцінки швидкості відносно води та характеристик потоку;
- метеорологічні дані – для уточнення вітрових і хвильових впливів.

Запропонована модифікація дозволяє реалізувати механізм асиміляції даних у реальному часі та підвищити точність прогнозування траєкторії руху судна. Це, у свою чергу, створює передумови для ефективної роботи алгоритмів підтримки навігаційних рішень та оптимізації експлуатаційних параметрів контейнеровозів.

*Архітектура інтегрованої навігаційно-інформаційної системи*

З метою забезпечення ефективної обробки великих обсягів даних та реалізації алгоритмів підтримки навігаційних рішень запропоновано багаторівневу архітектуру інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровоза. Архітектура побудована за ієрархічним принципом і включає чотири функціональні рівні (Рис. 1): сенсорний, рівень обробки даних, алгоритмічний рівень та рівень прийняття рішень.

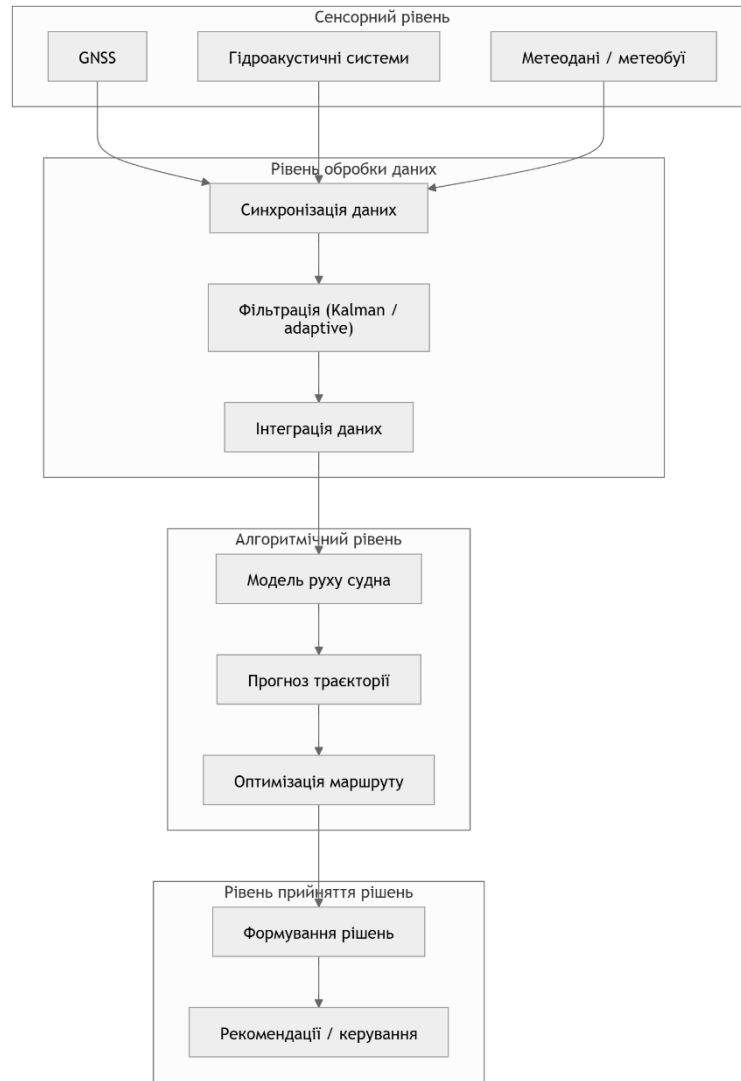


Рисунок 1 – Архітектура інтегрованої навігаційно-інформаційної системи

Сенсорний рівень забезпечує первинний збір даних із різномірних джерел навігаційної інформації. До його складу входять:

- GNSS-системи, що забезпечують визначення координат, швидкості та курсу судна відносно ґрунту;
- гідроакустичні системи, які надають інформацію про швидкість судна відносно води, глибину та характеристики підводного середовища;
- метеорологічні засоби (включаючи метеобуї), що формують дані про вітер, хвилювання та інші параметри морського середовища.

Характерною особливістю цього рівня є різна частота оновлення, точність і формат даних, що зумовлює необхідність їх подальшої узгодженої обробки.

На рівні обробки даних реалізується попередня обробка інформації, що включає:

- синхронізацію часових рядів;
- фільтрацію шумів і викидів;
- узгодження координатних систем.

Ключовим інструментом є використання фільтрів Калмана (Kalman Filter) та їх адаптивних модифікацій, які дозволяють:

- оцінювати стан судна (позиція, швидкість, курс);
- зменшувати вплив похибок вимірювань;

- інтегрувати дані з різних джерел у єдиному векторі стану.

Адаптивні фільтри додатково враховують змінність характеристик середовища та сенсорів, що підвищує стійкість системи.

Алгоритмічний рівень є ядром системи та реалізує основні функції прогнозування та оптимізації. До його складу входять:

- моделі прогнозування руху судна, побудовані на основі математичної моделі (розділ 4) із урахуванням коригуючих членів;

- алгоритми оптимізації маршруту, які мінімізують витрати палива, час переходу або ризику, враховуючи зовнішні умови.

На цьому рівні можуть застосовуватися:

- методи оптимального керування;
- чисельні алгоритми оптимізації;
- елементи штучного інтелекту для адаптації до змінних умов.

Верхній рівень системи – рівень прийняття рішень, забезпечує формування рекомендацій або автоматизованих рішень для судноводія чи системи керування. Основні функції:

- оцінка альтернативних сценаріїв руху;
- вибір оптимальної стратегії навігації;
- формування керуючих впливів або рекомендацій (курс, швидкість, маршрут).

На цьому рівні інтегруються результати прогнозування та оптимізації з урахуванням заданих критеріїв ефективності (паливна економічність, безпека, дотримання графіка).

*Алгоритмічне забезпечення обробки навігаційних даних та підтримки прийняття рішень*

Ключовим елементом запропонованої інтегрованої навігаційно-інформаційної системи є алгоритмічне забезпечення, що реалізує повний цикл обробки великих обсягів даних, прогнозування руху судна та формування оптимальних навігаційних рішень. На відміну від традиційних підходів, алгоритм орієнтований на роботу в умовах невизначеності та забезпечує адаптивність за рахунок використання даних у реальному часі.

Алгоритм інтегрованої обробки навігаційних даних і підтримки прийняття рішень базується на поетапному перетворенні первинної інформації у керуючі впливи або рекомендації для судноводія. Вхідними даними є синхронізовані потоки інформації від глобальних навігаційних супутникових систем, гідроакустичних засобів вимірювання та метеорологічних джерел. Виходом алгоритму є множина оптимальних навігаційних рішень, що відповідають заданим критеріям ефективності.

На першому етапі здійснюється збір та синхронізація даних, що надходять із різних джерел із різною частотою оновлення. Це дозволяє сформувати узгоджений у часі інформаційний масив, придатний для подальшої обробки. Далі виконується фільтрація шумів, усунення аномальних значень і приведення даних до єдиної координатної та метричної системи. Для цього використовуються методи оптимальної фільтрації, зокрема фільтр Калмана та його адаптивні модифікації.

На наступному етапі формується оцінка вектора стану судна, який включає координати, швидкість, курс та їх похідні. Отриманий вектор використовується як початковий стан для прогнозування траєкторії руху судна на основі математичної моделі, наведеної вище. Прогнозування здійснюється з урахуванням зовнішніх впливів і внутрішніх характеристик судна.

З метою підвищення точності прогнозу застосовується механізм корекції, що базується на асиміляції даних у реальному часі. На цьому етапі виконується порівняння прогнозованих параметрів із фактичними вимірюваннями, після чого формується коригуючий вплив, який враховує невизначеності середовища та похибки моделі.

Після уточнення траєкторії здійснюється оцінка ефективності можливих сценаріїв руху за сукупністю критеріїв, серед яких основними є витрати палива, тривалість переходу та рівень навігаційної безпеки. Це дозволяє перейти до фінального етапу – генерації оптимального навігаційного рішення, яке може бути представлене у вигляді рекомендацій щодо зміни курсу, швидкості або маршруту.

Формалізований вигляд алгоритму наведено нижче.

**Algorithm 1: Integrated Navigation Data Processing and Decision Support**

**Input:** GNSS data, hydroacoustic data, meteorological data

**Output:** Optimal navigation decision set

**Steps:**

1. Acquire and synchronize input data
2. Filter noise and inconsistencies
3. Estimate vessel state vector
4. Predict trajectory using dynamic model
5. Apply correction based on real-time data
6. Evaluate performance criteria (fuel, time, safety)
7. Generate optimal decision

Запропонований алгоритм забезпечує замкнений цикл обробки даних і прийняття рішень, що дозволяє підвищити точність прогнозування руху судна, знизити вплив невизначеностей морського середовища та покращити експлуатаційні показники контейнеровозів у трансокеанських перевезеннях. Важливою перевагою є можливість масштабування алгоритму та його інтеграції з сучасними системами підтримки прийняття рішень і інтелектуальними навігаційними платформами.

*Обговорення результатів*

Отримані результати свідчать про доцільність застосування інтегрованого алгоритмічного підходу до обробки навігаційних даних у задачах підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів. Запропонована система, що поєднує математичне моделювання руху судна з механізмами асиміляції даних у реальному часі, демонструє покращення точності прогнозування траєкторії та стабільності навігаційних рішень у порівнянні з традиційними підходами.

Інтерпретація результатів показує, що ключовим фактором підвищення ефективності є саме синергія різнорідних джерел даних, яка дозволяє компенсувати обмеження окремих сенсорів. Зокрема, використання GNSS забезпечує високу точність позиціонування відносно ґрунту, тоді як гідроакустичні системи дозволяють уточнювати швидкість відносно води, а метеорологічні дані – коригувати вплив зовнішнього середовища. Їх інтеграція в межах єдиного алгоритмічного контуру забезпечує більш адекватну оцінку стану судна та умов його руху.

Разом з тим, результати дослідження необхідно розглядати з урахуванням низки обмежень, пов'язаних із характеристиками вихідних даних та умовами їх отримання.

По-перше, затримки та похибки GNSS-вимірювань можуть впливати на точність оцінки координат і швидкості судна. У реальних умовах можливі короточасні втрати сигналу, часові затримки, що призводить до розбіжностей між фактичним і оціненим положенням судна. Незважаючи на застосування фільтрації, ці ефекти можуть накопичуватися та впливати на якість прогнозу.

По-друге, шум і нестабільність даних гідроакустичних систем (зокрема лагів і ехолотів) обумовлені гідродинамічними явищами, турбулентністю потоку та станом морського середовища. Це може призводити до похибок у визначенні швидкості судна відносно води, що критично для коректного моделювання руху та оцінки впливу течій.

По-третє, нестабільність метеорологічних даних є суттєвим фактором невизначеності. Дані від метеобуїв або прогнозних моделей можуть мати обмежену просторово-часову роздільну здатність, що ускладнює точне врахування локальних змін вітру та хвильових умов. У випадку швидкої зміни погодних умов це може призводити до зниження ефективності алгоритмів оптимізації маршруту.

Таким чином, хоча запропонована система демонструє покращення експлуатаційних показників, її ефективність значною мірою залежить від якості вхідних даних та надійності сенсорної інфраструктури. Це вказує на необхідність подальших досліджень у напрямі підвищення стійкості алгоритмів до невизначеностей, зокрема шляхом використання більш розвинених методів адаптивної фільтрації, машинного навчання та прогнозування параметрів морського середовища.

У перспективі доцільним є також розширення системи за рахунок додаткових джерел даних (наприклад, супутникового дистанційного зондування або флотських мереж обміну даними), що дозволить підвищити повноту та достовірність інформаційного забезпечення навігаційних рішень.

### Висновки.

Розроблено алгоритмічне забезпечення інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровозів, яке базується на поєднанні математичної моделі руху судна та механізмів асиміляції великих обсягів даних у реальному часі. Запропонований підхід забезпечує формування цілісного інформаційного середовища для підтримки навігаційних рішень.

Встановлено, що інтеграція даних GNSS, гідроакустичних та метеорологічних систем із використанням адаптивної фільтрації дозволяє суттєво підвищити точність оцінки параметрів руху судна та прогнозування його траєкторії порівняно з традиційними підходами.

Доведено, що застосування алгоритмів прогнозування та оптимізації маршруту на основі уточнених моделей руху сприяє зниженню експлуатаційних витрат, зокрема витрат палива та часу переходу, за рахунок більш раціонального вибору режимів руху та траєкторії.

Показано, що запропонована архітектура системи та алгоритмічні рішення є універсальними та можуть бути адаптовані для використання на контейнеровозах ULCV, враховуючи їх інерційні характеристики та специфіку експлуатації у трансокеанських перевезеннях.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування інтегрованих навігаційно-інформаційних систем із елементами інтелектуальної обробки даних як інструменту підвищення ефективності експлуатації морського транспорту, що створює передумови для подальшого розвитку цифрових та автономних технологій у судноплаванні.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Zeinurrohman, R., Trimulyono, A., Wicaksono, A., Hadi, E. S., Samuel, S., Hakim, M. L., & Purwanto, D. B. (2024). Analysis of empirical method for predicting maneuverability of ultra-large container ship using Maneuvering Modelling Group (MMG) model. *SINERGI*, 28(2), 369. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.2.016>
2. Okuda, R., Yasukawa, H., & Matsuda, A. (2023). Validation of maneuvering simulations for a KCS at different forward speeds using the 4-DOF MMG method. *Ocean Engineering*, 284, 115174. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115174>
3. Lesnevskiy, V. M., & Kalinichenko, Y. V. (2025). Analysis of current approaches to identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 52, 197–204. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>
4. Atasayan, E., Milanov, E., & Alkan, A. D. (2024). A Study Evaluating the Performance of Nonlinear Nomoto Models in Predicting the Manoeuvring of Car Carrier. *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710751>
5. Taniguchi, T., & Maki, A. (2025). A proposal of the maneuvering motion model for low-speed operations in harbor. *Ocean Engineering*, 330, 121172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121172>
6. Tiano, A., Zirilli, A., Cuneo, M., & Pagnan, S. (2005). Multisensor Data Fusion Applied to Marine Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 219(3), 121–130. <https://doi.org/10.1243/147509005X10512>
7. Liu, W., Liu, Y., & Bucknall, R. (2023). Filtering based multi-sensor data fusion algorithm for a reliable unmanned surface vehicle navigation. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(2), 67–83. <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2031558>
8. Zhuang, Y., Sun, X., Li, Y., Huai, J., Hua, L., Yang, X., Cao, X., Zhang, P., Cao, Y., Qi, L., Yang, J., El-Bendary, N., El-Sheimy, N., Thompson, J., & Chen, R. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*, 95, 62–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>
9. Zhang, Y. (2024). Application of multi-sensor fusion technology. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 119, 752–757. <https://doi.org/10.54097/bb6dztv74>
10. Iqbal, U., Abosekeen, A., Elsheikh, M., Noureldin, A., & Korenberg, M. J. (2022). A Review of Sensor System Schemes for Integrated Navigation. *2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSPA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCSPA55860.2022.10019177>
11. Hermawan, Y. A., Adinda Rahmi, L. P., Widjaja, R. S., & Yulianto, T. (2025). Weather-Based Ship Route Planning by Considering Added Resistance for Improving Fuel Efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1461(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1461/1/012028>

12. Cheng, C.-W., Tzeng, Y.-A., Chang, M.-H., Liu, S.-C., Cheung, H.-K., & Hsin, C.-Y. (2024). Application of Computational Fluid Dynamics and Semi-Empirical Speed Loss Prediction for Weather Routing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/jmse13010042>
13. Kobayashi, E., Hashimoto, H., Taniguchi, Y., & Yoneda, S. (2015). Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IAIN.2015.7352247>
14. Putri Adinda Rahmi, L., & Hermawan, Y. A. (2025). Mitigating Schedule Delays in Maritime Operations Through Weather-Based Routing Strategies. *BIO Web of Conferences*, 157, 11001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515711001>
15. Pennino, S., Gaglione, S., Innac, A., Piscopo, V., & Scamardella, A. (2020). Development of a New Ship Adaptive Weather Routing Model Based on Seakeeping Analysis and Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 270. <https://doi.org/10.3390/jmse8040270>
16. Jiang, Y., Chang, Y., Zhang, B., Ge, Y., & Zhao, X. (2026). A review of vessel trajectory prediction research: Methodological evolution, current challenges, and future directions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100754. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100754>
17. Liu, R. W., Liang, M., Nie, J., Deng, X., Xiong, Z., Kang, J., Yang, H., & Zhang, Y. (2021). Intelligent Data-Driven Vessel Trajectory Prediction in Marine Transportation Cyber-Physical System. *2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics)*, 314-321. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00058>
18. Murray, B., & Perera, L. P. (2020). A dual linear autoencoder approach for vessel trajectory prediction using historical AIS data. *Ocean Engineering*, 209, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107478>
19. Zhu, M., Han, P., Wang, C., Skulstad, R., Zhang, H., & Li, G. (2025). An AIS Data-Driven Hybrid Approach to Ship Trajectory Prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 55(1), 96–109. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3458469>
20. Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel Trajectory Prediction in Maritime Transportation: Current Approaches and Beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980–19998. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574>

## REFERENCES

1. Zeinurrohman, R., Trimulyono, A., Wicaksono, A., Hadi, E. S., Samuel, S., Hakim, M. L., & Purwanto, D. B. (2024). Analysis of empirical method for predicting maneuverability of ultra-large container ship using Maneuvering Modelling Group (MMG) model. *SINERGI*, 28(2), 369. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.2.016>
2. Okuda, R., Yasukawa, H., & Matsuda, A. (2023). Validation of maneuvering simulations for a KCS at different forward speeds using the 4-DOF MMG method. *Ocean Engineering*, 284, 115174. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115174>
3. Lesnevskiy, V. M., & Kalinichenko, Y. V. (2025). Analysis of current approaches to identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences, 52, 197–204. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>
4. Atasayan, E., Milanov, E., & Alkan, A. D. (2024). A Study Evaluating the Performance of Nonlinear Nomoto Models in Predicting the Manoeuvring of Car Carrier. *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710751>
5. Taniguchi, T., & Maki, A. (2025). A proposal of the maneuvering motion model for low-speed operations in harbor. *Ocean Engineering*, 330, 121172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121172>
6. Tiano, A., Zirilli, A., Cuneo, M., & Pagnan, S. (2005). Multisensor Data Fusion Applied to Marine Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 219(3), 121–130. <https://doi.org/10.1243/147509005X10512>
7. Liu, W., Liu, Y., & Bucknall, R. (2023). Filtering based multi-sensor data fusion algorithm for a reliable unmanned surface vehicle navigation. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(2), 67–83. <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2031558>
8. Zhuang, Y., Sun, X., Li, Y., Huai, J., Hua, L., Yang, X., Cao, X., Zhang, P., Cao, Y., Qi, L., Yang, J., El-Bendary, N., El-Sheimy, N., Thompson, J., & Chen, R. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*, 95, 62–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>

9. Zhang, Y. (2024). Application of multi-sensor fusion technology. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 119, 752–757. <https://doi.org/10.54097/bb6dzv74>
10. Iqbal, U., Abosekeen, A., Elsheikh, M., Noureldin, A., & Korenberg, M. J. (2022). A Review of Sensor System Schemes for Integrated Navigation. 2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSIPA), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCSIPA55860.2022.10019177>
11. Hermawan, Y. A., Adinda Rahmi, L. P., Widjaja, R. S., & Yulianto, T. (2025). Weather-Based Ship Route Planning by Considering Added Resistance for Improving Fuel Efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1461(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1461/1/012028>
12. Cheng, C.-W., Tzeng, Y.-A., Chang, M.-H., Liu, S.-C., Cheung, H.-K., & Hsin, C.-Y. (2024). Application of Computational Fluid Dynamics and Semi-Empirical Speed Loss Prediction for Weather Routing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/jmse13010042>
13. Kobayashi, E., Hashimoto, H., Taniguchi, Y., & Yoneda, S. (2015). Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN), 1–8. <https://doi.org/10.1109/IAIN.2015.7352247>
14. Putri Adinda Rahmi, L., & Hermawan, Y. A. (2025). Mitigating Schedule Delays in Maritime Operations Through Weather-Based Routing Strategies. *BIO Web of Conferences*, 157, 11001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515711001>
15. Pennino, S., Gaglione, S., Innac, A., Piscopo, V., & Scamardella, A. (2020). Development of a New Ship Adaptive Weather Routing Model Based on Seakeeping Analysis and Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 270. <https://doi.org/10.3390/jmse8040270>
16. Jiang, Y., Chang, Y., Zhang, B., Ge, Y., & Zhao, X. (2026). A review of vessel trajectory prediction research: Methodological evolution, current challenges, and future directions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100754. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100754>
17. Liu, R. W., Liang, M., Nie, J., Deng, X., Xiong, Z., Kang, J., Yang, H., & Zhang, Y. (2021). Intelligent Data-Driven Vessel Trajectory Prediction in Marine Transportation Cyber-Physical System. 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics), 314–321. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00058>
18. Murray, B., & Perera, L. P. (2020). A dual linear autoencoder approach for vessel trajectory prediction using historical AIS data. *Ocean Engineering*, 209, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107478>
19. Zhu, M., Han, P., Wang, C., Skulstad, R., Zhang, H., & Li, G. (2025). An AIS Data-Driven Hybrid Approach to Ship Trajectory Prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 55(1), 96–109. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3458469>
20. Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel Trajectory Prediction in Maritime Transportation: Current Approaches and Beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980–19998. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574>

**Holovan A.I., Moniushko M.M.**

## **ALGORITHMIC SUPPORT FOR INTEGRATED NAVIGATION AND INFORMATION SYSTEMS ON CONTAINER SHIPS TO IMPROVE OPERATIONAL EFFICIENCY**

*The growth in transoceanic shipping volumes and the introduction of large- and ultra-large-capacity container ships ULCVs have led to increased demands for navigational accuracy, energy efficiency, and sound management decisions in the face of the uncertainties of the maritime environment. Traditional approaches to navigation, based on the use of isolated data sources and deterministic models, do not provide an adequate level of adaptability to changing external influences and limit the possibilities for optimizing ship operational parameters. The aim of this work is to develop algorithmic support for integrated navigation and information systems for container ships based on big data processing, mathematical modeling of ship motion, and methods of intelligent information processing. The study proposes an approach that combines data from global navigation satellite systems GNSS, hydroacoustic measurement devices, and meteorological observations using adaptive filtering methods, in particular Kalman filters, to form a consistent ship state vector. A mathematical model of ship motion based on the 3DOF approach has been refined to account for the effects of waves, wind, and currents, supplemented by correction terms generated through real-time data assimilation. An algorithm for integrated processing of navigation data and decision support is proposed, which enables ship trajectory*

*prediction and route optimization based on multi-criteria indicators such as fuel consumption, voyage duration, and navigation safety. The results obtained demonstrate an increase in the accuracy of motion parameter estimation and trajectory prediction, as well as a reduction in operating costs due to a more rational selection of motion modes. It is shown that the proposed approach is universal and can be applied to container ships of various classes, in particular ULCVs, considering their inertial characteristics. The practical value of this work lies in the possibility of integrating the developed algorithmic software into modern navigation systems and digital maritime transport management platforms, which creates prerequisites for the further development of intelligent and autonomous navigation technologies.*

**Keywords:** *operational efficiency; container ships; ULCV; navigation and information systems; GNSS; hydroacoustic systems; meteorological data; mathematical modeling of ship motion; decision support algorithms; artificial intelligence.*

*Стаття прийнята 10.03.2026*