

УДК 629.5.015:519.876.5

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351125

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАНЕВРУВАННЯ СУДЕН

- Лесневський В.М.** здобувач ступеня доктора філософії, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4195-5678>, e-mail: vlad.lesnevskiy@gmail.com;
- Калініченко Є.В.** канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

У статті виконано комплексний огляд і систематизацію сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. Проаналізовано класичні орієнтовані на модель параметричні підходи, засновані на використанні математичних моделей типу *Nototo* та *MMG* у поєднанні з методами найменших квадратів і фільтрами Калмана, а також рекурсивні й онлайн-алгоритми, орієнтовані на адаптацію параметрів у реальному часі. Особливу увагу приділено нелінійним, інноваційним і орієнтованим на дані методам, зокрема підходам на основі регресії опорних векторів, регресії гаусівського процесу на нейронних мережах, які дозволяють враховувати складні нелінійні ефекти та змінні умови експлуатації. Проведено класифікацію розглянутих методів за типами математичних моделей, алгоритмами ідентифікації, джерелами вихідних даних і рівнем придатності для використання в системах управління рухом суден. Показано, що традиційні орієнтовані на модель підходи характеризуються фізичною інтерпретованістю параметрів, проте мають обмежену точність і адаптивність у реальних умовах плавання. Сучасні орієнтовані на дані та інтелектуальні методи, навпаки, забезпечують підвищену точність і здатність до адаптації, однак супроводжуються зростанням обчислювальної складності та проблемами інтерпретованості результатів. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність розвитку гібридних (*grey-box*) підходів, які поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі з адаптивними орієнтованими на дані алгоритмами. Зазначено, що такі підходи є перспективними для інтеграції в системи підтримки прийняття рішень, цифрові двійники суден та інтелектуальні навігаційні комплекси. Отримані результати створюють наукові передумови для подальших досліджень, спрямованих на розроблення адаптивних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з використанням експлуатаційних навігаційних даних та підвищення ефективності управління рухом у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: маневрування суден, динамічні характеристики, ідентифікація параметрів, управління рухом судна, математичне моделювання, адаптивні методи, підходи орієнтовані на дані, гібридні моделі.

Постановка проблеми

Ефективність управління рухом судна значною мірою визначається точністю врахування його динамічних характеристик під час маневрування, зокрема параметрів курсової стійкості, маневреності та керованості. В умовах зростання інтенсивності судноплавства, ускладнення навігаційної обстановки та розширення застосування автоматизованих і інтелектуальних навігаційних систем вимоги до достовірності інформації про динаміку руху судна істотно зростають.

На практиці процес управління рухом судна часто ґрунтується на заздалегідь визначених або спрощених параметрах маневреності, отриманих за результатами натурних випробувань або аналітичних розрахунків. Проте такі параметри не завжди адекватно відображають реальний динамічний стан судна в умовах змінного завантаження, впливу гідрометеорологічних факторів, обмежених акваторій та зносу елементів рушійно-кермового комплексу. Це призводить до зниження точності прогнозування траєкторії руху та, як наслідок, до зростання ризику навігаційних помилок.

Сучасні методи ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден характеризуються значною різноманітністю підходів – від класичних

модельно-орієнтованих до орієнтованих на дані та інтелектуальних. Водночас більшість із них має обмежену адаптивність або потребує спеціально організованих маневрових експериментів, що ускладнює їх практичне застосування у процесі повсякденної експлуатації суден. Недостатньо вирішеним залишається питання забезпечення балансу між точністю ідентифікації, обчислювальною складністю алгоритмів та можливістю їх інтеграції у системи управління рухом у реальному часі.

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною задачею є обґрунтування та розвиток підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, які б забезпечували підвищення ефективності процесу управління рухом за рахунок використання експлуатаційних навігаційних даних та адаптації до реальних умов плавання. Вирішення цієї задачі є важливим для підвищення безпеки судноплавства, зменшення навігаційних ризиків та створення передумов для впровадження сучасних інтелектуальних систем управління рухом суден.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден є предметом активних наукових досліджень упродовж останніх десятиліть, що зумовлено підвищеними вимогами до точності управління рухом суден у складних навігаційних умовах, а також розвитком автоматизованих і інтелектуальних систем судноводіння. Аналіз сучасних публікацій свідчить про поступовий перехід від класичних параметричних методів ідентифікації до адаптивних, нелінійних та орієнтованих на дані підходів.

Традиційні орієнтовані на модель методи ідентифікації, засновані на лінійних або квазілінійних математичних моделях руху судна, зокрема моделях Nomoto та MMG, широко використовуються для визначення гідродинамічних коефіцієнтів і параметрів керованості. Для їх реалізації застосовуються методи найменших квадратів, рекурсивні алгоритми та фільтри Калмана, що дозволяє оцінювати параметри руху на основі експериментальних або експлуатаційних даних. Водночас дослідження показують обмежену точність таких підходів у разі наявності нелінійних ефектів, шумів навігаційних вимірювань та змінних умов експлуатації [1-3].

З метою підвищення адаптивності ідентифікації у реальному часі значного розвитку набули рекурсивні та онлайн-методи, що передбачають використання факторів забування, адаптивних фільтрів та оновлення параметрів на основі поточних навігаційних даних. У низці робіт показано, що такі підходи дозволяють підвищити точність прогнозування траєкторії руху судна за умов змінних гідрометеорологічних впливів, однак вони залишаються чутливими до накопичення похибок та дрейфу параметрів [4-6].

Подальший розвиток отримали нелінійні та інноваційні методи ідентифікації, спрямовані на врахування складних динамічних зв'язків між керуючими впливами та реакцією судна. Запропоновані алгоритми інноваційних найменших квадратів і нелінійні методи підтримуючих векторних машин демонструють покращену збіжність і стійкість до шумів порівняно з класичними методами, проте супроводжуються зростанням обчислювальної складності [7-9].

Суттєвий інтерес у сучасних дослідженнях викликають орієнтовані на дані методи, зокрема підходи на основі support vector regression, Gaussian process regression та нейронних мереж. Показано, що непараметричні моделі дозволяють ефективно описувати нелінійну динаміку маневрування суден та забезпечують високу точність ідентифікації навіть за обмежених обсягів навчальних вибірок [10-12]. Особливу увагу приділено Gaussian process regression, яка, окрім прогнозування, забезпечує оцінювання невизначеності результатів, що є важливим для систем підтримки прийняття рішень [13, 14].

Разом з тим, застосування методів машинного та глибинного навчання, зокрема LSTM та ансамблевих

нейронних мереж, супроводжується проблемами інтерпретованості результатів і потребує значних обсягів якісних даних для навчання моделей, що обмежує їх пряме використання в задачах управління рухом у реальному часі [15, 16].

Перспективним напрямом розвитку вважаються гібридні (grey-box) підходи, що поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі руху судна з орієнтованими на дані калібраторами та адаптивними алгоритмами корекції параметрів. Дослідження підтверджують, що такі підходи дозволяють досягти балансу між точністю ідентифікації, фізичною інтерпретованістю параметрів та можливістю інтеграції результатів у системи управління рухом і автономного судноводіння [17-19].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про відсутність універсального методу ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, здатного одночасно забезпечити високу точність, адаптивність і простоту практичної реалізації. Це обумовлює актуальність подальших досліджень, спрямованих на розроблення методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних та інтеграцію результатів ідентифікації у процес управління рухом судна.

Для забезпечення репрезентативності та зменшення суб'єктивності огляду було застосовано цілеспрямований відбір наукових публікацій за тематикою ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. Пошук джерел здійснювався у міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect) та фахових журналах морського профілю за ключовими словами ship maneuvering, parameter identification, system identification, data-driven ship dynamics, Gaussian process, support vector regression, online identification.

До огляду включалися публікації, що:

- (i) безпосередньо стосуються ідентифікації параметрів маневрування суден або моделей руху;
- (ii) містять формалізований метод ідентифікації;
- (iii) опубліковані переважно у період з 2008 по 2025 рр.

Роботи, орієнтовані виключно на задачі керування без аналізу процесу ідентифікації параметрів, до огляду не включалися. Такий підхід дозволив сформувати збалансований корпус літератури та зменшити ризик зміщення вибірки.

Мета статті

Мета статті полягає в аналізі та систематизації сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх впливу на ефективність процесу управління рухом, а також в обґрунтуванні доцільності підвищення точності й адаптивності методів ідентифікації для використання в реальних умовах експлуатації суден.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є методи ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден у задачах управління рухом. Предметом дослідження виступають підходи та алгоритми ідентифікації параметрів руху судна з точки зору їх точності, адаптивності та практичної придатності для використання в реальних умовах експлуатації.

Матеріалами дослідження слугували наукові публікації у фахових журналах і матеріалах міжнародних конференцій, присвячені орієнтованим на дані, модельно-орієнтованим і гібридним методам ідентифікації. У роботі застосовано методи аналітичного та порівняльного аналізу, систематизації й узагальнення, а також формалізоване порівняння методів за ключовими критеріями ефективності з використанням шкали оцінювання 0 / + / ++.

Виклад основного матеріалу

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що проблема ідентифікації динамічних характеристик

маневрування суден розглядається з різних методологічних позицій, що зумовлено складністю фізичних процесів руху судна та різноманіттям умов його експлуатації. Існуючі підходи відрізняються як за рівнем формалізації математичних моделей, так і за типами використовуваних експериментальних і навігаційних даних, що ускладнює їх безпосереднє порівняння та практичний вибір для задач управління рухом. У наукових дослідженнях застосовуються класичні параметричні орієнтовані на модель методи, рекурсивні та онлайн-алгоритми ідентифікації, нелінійні й інноваційні методи, а також сучасні орієнтовані на дані підходи на основі машинного навчання та штучного інтелекту. Окремий напрям становлять гібридні (grey-box) моделі, що поєднують фізично обґрунтовані рівняння руху судна з адаптивними алгоритмами корекції параметрів на основі експлуатаційних даних. Кожен із зазначених підходів (табл. 1) має власні переваги та обмеження щодо точності ідентифікації, обчислювальної складності, стійкості до навігаційних шумів і можливості інтеграції в системи підтримки прийняття рішень.

Таблиця 1

Класифікація сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден

Клас методів	Основні представники	Вихідні дані	Переваги	Обмеження	Застосовність для управління рухом	Джерело
Класичні параметричні орієнтовані на модель методи	LS, RLS, EKF, UKF; Nomoto, MMG	Натурні маневрові випробування	Фізична інтерпретованість; простота	Чутливість до шумів; низька адаптивність	Обмежена, переважно offline	[1]
Рекурсивні та онлайн-методи ідентифікації	RLS з фактором забування, adaptive EKF	AIS, GNSS, курсові дані	Адаптація в реальному часі	Дрейф параметрів; нестійкість	Висока	[4]
Нелінійні та інноваційні методи	Multi-innovation LS, NLSSVM	Комбіновані дані	Швидка збіжність; підвищена точність	Обчислювальна складність	Середня–висока	[7]
Методи на основі Support Vector Machines	SVR, LS-SVR, ϵ -SVR, AWLS-SVR	Експлуатаційні траєкторні дані	Робастність; точність	Складність налаштування; слабка інтерпретація	Висока	[10]
Gaussian Process Regression (GPR)	GPR, sparse GPR, multi-output GPR	Обмежені навігаційні вибірки	Оцінка невізначеності; ефективність при малих даних	Обчислювальні витрати	Висока	[11]
Нейронні мережі та глибинне навчання	LSTM, RBF, FNN, ensemble learning	Великі масиви даних	Модельовання нелінійностей	«Чорна скринька»	Висока, з обмеженнями	[15]
Гібридні (grey-box) підходи	Physics-informed ML + Nomoto/MMG	Моделі + експлуатаційні дані	Баланс точності й інтерпретації	Складність реалізації	Дуже висока	[18]
Інтелектуальні адаптивні ансамблеві методи	Ensemble learning, adaptive weighting	Дані різних режимів руху	Робастність до змін умов	Підвищена складність	Перспективна	[20]

З огляду на це виникає необхідність систематизації існуючих методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з урахуванням їх методологічних особливостей, типів вхідних даних та рівня придатності для задач управління рухом у реальних умовах експлуатації. Така систематизація дозволяє не лише узагальнити сучасний стан наукових досліджень у даній галузі, але й окреслити перспективні напрями подальшого розвитку методів ідентифікації.

З урахуванням наведеного в роботі сформовано узагальнену класифікацію сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден, яку наведено у табл. 1. Класифікація базується на аналізі типів математичних моделей, використовуваних алгоритмів ідентифікації, джерел вихідних даних та можливостей практичного застосування отриманих результатів у процесі управління рухом судна.

У межах даного огляду під «класом методів» розуміється узагальнене сімейство підходів, об'єднаних спільною методологічною ідеєю і принципами ідентифікації, а не конкретний алгоритм. Зокрема, методи на основі support vector regression та Gaussian process regression розглядаються як окремі класи через відмінність їх математичної природи та можливостей оцінювання невизначеності, тоді як ансамблеві та адаптивні інтелектуальні підходи трактуються як стратегія побудови ідентифікаційних моделей, орієнтована на підвищення стійкості в змінних умовах експлуатації.

Критерій «застосовність для управління рухом судна», використаний у табл. 1, оцінювався з урахуванням можливості використання методу в режимі реального часу, вимог до наявності апріорної математичної моделі, обсягу необхідних експлуатаційних даних, обчислювальних витрат та рівня інтерпретованості

результатів. Під «високою» застосовністю розуміється можливість безпосередньої інтеграції методу в системи підтримки прийняття рішень або автоматизовані навігаційні комплекси без істотних обмежень за часом обчислень і стабільністю ідентифікації. Оцінка «перспективна» використовується для методів, які демонструють високий потенціал, але потребують додаткової адаптації або валідації в реальних експлуатаційних умовах.

Наведена класифікація свідчить, що сучасні дослідження у сфері ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден еволюціонують у напрямі адаптивних та гібридних методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних. При цьому ключовим викликом залишається забезпечення балансу між точністю ідентифікації, фізичною інтерпретованістю параметрів та можливістю інтеграції результатів у процес управління рухом судна в реальному часі.

З метою усунення суб'єктивності експертних оцінок та підвищення аналітичної цінності огляду проведено формалізоване порівняння основних класів методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден за низкою критеріїв, що мають принципове значення для задач управління рухом. До таких критеріїв віднесено можливість роботи в реальному часі, потребу в апріорній математичній моделі, вимоги до обсягу експлуатаційних даних, обчислювальні витрати, інтерпретованість результатів, здатність до оцінювання невизначеності та стійкість до навігаційних шумів.

У табл. 2 наведено результати формалізованого порівняння за шкалою «0 / + / ++».

Таблиця 2

Порівняльна оцінка сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден

Клас методів	Апріорна модель	Реальний час	Обсяг даних	Обчислювальні витрати	Інтерпретованість	Оцінка невизначеності	Стійкість до шумів
Класичні параметричні модельно-орієнтовані (Nomoto/MMG + LS, KF)	++	+	0	+	++	0	+
Рекурсивні та онлайн-методи (RLS, adaptive EKF)	+	++	+	+	+	+	+
Нелінійні та багатоінноваційні методи	+	+	+	0	+	0	+
Методи на основі SVM / SVR	0	+	+	+	0	0	++
Gaussian Process Regression (GPR)	0	+	++	0	+	++	++
Нейронні мережі та глибинне навчання (LSTM, RBF, ensemble)	0	+	0	0	0	0	+
Гібридні (grey-box) підходи	++	++	+	+	++	+	++
Інтелектуальні адаптивні ансамблеві стратегії	0	+	+	0	0	+	++

Формалізований аналіз, наведений у табл. 2, підтверджує, що жоден із розглянутих класів методів не є універсальним для всіх сценаріїв управління рухом судна. Класичні модельно-орієнтовані підходи характеризуються високою інтерпретованістю, але обмеженою адаптивністю, тоді як орієнтовані на дані методи забезпечують стійкість до шумів за рахунок зростання вимог до даних і обчислювальних ресурсів. Найбільш збалансовані показники демонструють гібридні (grey-box) підходи, що поєднують фізичну обґрунтованість моделей із можливістю адаптивної корекції параметрів у реальних умовах експлуатації.

Результати та їх обговорення

Результатом проведеного дослідження є систематизація та формалізоване порівняння сучасних методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх придатності для задач управління рухом. Отримані результати узагальнюють наявні наукові підходи та дозволяють виявити ключові закономірності їх розвитку, сильні сторони та обмеження в контексті практичного застосування.

Порівняльний аналіз, представлений у табл. 1 і 2, показує, що класичні модельно-орієнтовані методи забезпечують високу фізичну інтерпретованість параметрів, однак поступаються сучасним адаптивним і орієнтованим на дані підходам за рівнем точності та здатністю працювати в умовах змінних експлуатаційних факторів. Рекурсивні та онлайн-методи частково компенсують ці недоліки, проте залишаються чутливими до шумів і дрейфу параметрів при тривалій експлуатації.

Отримані результати узгоджуються з висновками попередніх досліджень, у яких наголошується на обмеженій універсальності окремих класів методів та необхідності компромісу між інтерпретованістю моделей і їх адаптивністю. Дані огляду підтверджують, що орієнтовані на дані методи, зокрема підходи на основі машинного навчання, демонструють підвищену стійкість до навігаційних шумів і нелінійних ефектів, однак потребують значних обсягів якісних даних та мають обмежену прозорість результатів.

Найбільш збалансовані результати за сукупністю критеріїв демонструють гібридні (grey-box) підходи, які поєднують фізично обґрунтовані математичні моделі з адаптивними алгоритмами корекції параметрів. Це пояснює зростаючий інтерес до таких методів у сучасних дослідженнях та їхню перспективність для інтеграції в системи підтримки прийняття рішень і автоматизовані навігаційні комплекси.

Таким чином, результати огляду підтверджують доцільність подальших досліджень, спрямованих на розвиток адаптивних і гібридних методів ідентифікації, а також на підвищення їх стійкості та відтворюваності в реальних умовах експлуатації суден. Отримані узагальнення мають як наукове значення для розвитку теорії ідентифікації динамічних систем, так і

практичну цінність для вдосконалення процесів управління рухом суден.

Висновки

У статті здійснено аналіз і систематизацію сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден з позицій їх впливу на ефективність процесу управління рухом. Показано, що еволюція методів ідентифікації відбувається у напрямі переходу від класичних параметричних модельно-орієнтованих підходів до адаптивних, нелінійних і орієнтованих на дані методів, орієнтованих на використання експлуатаційних навігаційних даних.

Установлено, що традиційні методи, засновані на натурних маневрових випробуваннях та спрощених математичних моделях, забезпечують фізичну інтерпретованість параметрів, проте мають обмежену точність і адаптивність в умовах змінних експлуатаційних факторів. Натомість сучасні орієнтовані на дані та інтелектуальні підходи дозволяють підвищити точність ідентифікації та забезпечити адаптацію параметрів у реальному часі, однак часто супроводжуються зростанням обчислювальної складності та проблемами інтерпретованості результатів.

Проведена класифікація методів ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден дозволила виділити гібридні підходи як найбільш перспективний напрям подальших досліджень, оскільки вони забезпечують баланс між точністю, адаптивністю та фізичною обґрунтованістю моделей. Особливої уваги потребує питання інтеграції результатів ідентифікації у системи підтримки прийняття рішень та інтелектуальні навігаційні комплекси.

Узагальнення результатів огляду дозволяє виокремити кілька типових сценаріїв застосування методів ідентифікації. В умовах обмежених обсягів даних і жорстких вимог до роботи в реальному часі (портові акваторії, внутрішні водні шляхи) найбільш доцільними є рекурсивні та гібридні підходи з адаптивною корекцією параметрів. Для задач офлайн-калібрування за наявності великих масивів експлуатаційних даних ефективними є орієнтовані на дані та нейромереві моделі. У системах автономного судноводіння особливого значення набувають методи, що забезпечують оцінювання невизначеності та стійкості до збурень, зокрема байєсівські та hybrid grey-box підходи.

Перспективи подальшого розвитку досліджень у даній галузі пов'язані з розробленням методів ідентифікації, здатних працювати в режимі реального часу на основі експлуатаційних навігаційних даних, враховувати змінні гідрометеорологічні умови та адаптуватися до індивідуальних особливостей судна. Доцільним є також поєднання методів ідентифікації з цифровими двійниками суден і автономними системами управління рухом, що створює передумови для підвищення безпеки судноплавства та ефективності навігаційних рішень.

Аналіз літератури дозволяє виділити низку відкритих наукових питань, що потребують подальших досліджень: (i) забезпечення ідентифікованості параметрів маневрування в умовах змінного навантаження та гідрометеорологічних впливів; (ii) розділення впливів керма, рушія, вітру та течії у процесі ідентифікації; (iii) компенсація дрейфу параметрів у тривалій експлуатації судна; (iv) перенесення ідентифікаційних моделей між суднами різних типів; (v) валідація методів на повномасштабних експлуатаційних даних. Усунення зазначених обмежень є ключовою передумовою підвищення ефективності управління рухом суден.

Перелік використаних джерел

- [1] Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines / Zhu M., Hahn A., Wen Y., Bolles A. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, The TransNav*. 2017. Vol. 11(1). Pp. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.01>.
- [2] Іванов С. В., Тєут В. М., Олійник П. Б. Ідентифікація параметрів математичної моделі судна для забезпечення автоматичного керування в умовах переходу. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Т. 3, no. 4(75). С. 32-36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42139>.
- [3] Song C., Zhang X., Zhang G. Nonlinear Identification for 4-DOF Ship Maneuvering Modeling via Full-Scale Trial Data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69(2). Pp. 1829-1835. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3062255>.
- [4] Ship Steering Adaptive CGS Control Based on EKF Identification Method / Guan W., Peng H., Zhang X., Sun H. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(2). Article 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10020294>.
- [5] Nguyen H. D. Recursive identification of ship manoeuvring dynamics and hydrodynamics. *ANZIAM Journal*. 2008. Vol. 49. Pp. 717-732. DOI: <https://doi.org/10.21914/anziamj.v49i0.358>.
- [6] Online Identification Method for Motion Model Parameters of Unmanned Surface Vehicle / X. Sun et al. *37th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Xiamen, China, 16-19 May 2025. Pp. 1681-1685. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC65474.2025.11090779>.
- [7] Bai W., Ren J., Li T. Multi-Innovation Gradient Iterative Locally Weighted Learning Identification for A Nonlinear Ship Maneuvering System. *China Ocean Engineering*. 2018. Vol. 32(3). Pp. 288-300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13344-018-0030-0>.
- [8] Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm / C. Chen et al. *ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, 9-14 June 2019. Article V07BT06A028. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95565>.
- [9] A Constrained Least Squares Algorithm for Maneuvering Dynamics Identification of Marine Crafts / Y. Zhong et al. *42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, 24-26 July 2023. Pp. 1379-1384. DOI: <https://doi.org/10.23919/CCC58697.2023.10240564>.
- [10] System Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion Based on ϵ -Support Vector Regression / B. Liu et al. *ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, 9-14 June 2019. Article V07AT06A067. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-96699>.
- [11] Identification and Prediction of Ship Maneuvering Motion Based on a Gaussian Process with Uncertainty Propagation / Xue Y., Liu Y., Xue G., Chen G. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(8). Article 804. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9080804>.
- [12] Zhang Z., Ren J. Locally Weighted Non-Parametric Modeling of Ship Maneuvering Motion Based on Sparse Gaussian Process. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(6). Article 606. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9060606>.
- [13] Identification of USV Maneuvering Model Based on Multi-Output Gaussian Process Regression / Z. Hong et al. *2023 China Automation Congress (CAC)*, Chongqing, China, 17-19 November 2023. Pp. 6300-6305. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC59555.2023.10451338>.
- [14] Dynamic system identification of underactuated ship dynamics based on Gaussian process regression / Zhang P., Liu J., Xie L., Li S. *2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Wuhan, China, 22-24 October 2021. Pp. 954-960. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTIS54573.2021.9798415>.
- [15] Identification modeling and prediction of ship maneuvering motion based on LSTM deep neural network / Y. Jiang et al. *Journal of Marine Science and Technology*. 2022. Vol. 27(1). Pp. 125-137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00819-9>.
- [16] Self-organizing data-driven prediction model of ship maneuvering fast-dynamics / N. Wang et al. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 288. Article 115989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115989>.
- [17] Li S. Y., Xiang J., Xia G. H. Enhancing Ship Maneuvering Models through Hybrid Integration of Data-Driven Velocity Calibrator for Improved Performance. *OCEANS 2024 – Singapore*, Singapore, Singapore, 15-18 April 2024. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS51537.2024.10682323>.
- [18] Incorporating Approximate Dynamics Into Data-Driven Calibrator: A Representative Model for Ship Maneuvering Prediction / T. Wang et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 18(3).

- Pp. 1781-1789. DOI: [20] Online prediction of ship maneuvering motions based on adaptive weighted ensemble learning under dynamic changes / Y. Yu et al. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2024. Vol. 18(1). Article 2341922. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3088404>.
- [19] Multi-objective optimal input design for grey-box identification modelling of ship manoeuvring motion / L. Jiang et al. *Ships and Offshore Structures*. 2025. Vol. 20(2). Pp. 178-187. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2335452>.

ANALYSIS OF CURRENT APPROACHES TO IDENTIFYING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SHIP MANEUVERING

- Lesnevskiy V.M.** PhD student, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4195-5678>, e-mail: vlad.lesnevskiy@gmail.com;
- Kalinichenko Y.V.** PhD (Engineering), associate professor, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-7313>, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

The article provides a comprehensive review and systematization of modern methods for identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. It analyzes classical model-oriented parametric approaches based on the use of mathematical models such as Nomoto and MMG in combination with least squares methods and Kalman filters, as well as recursive and online algorithms focused on real-time parameter adaptation. Particular attention is paid to nonlinear, innovative, and data-oriented methods, in particular approaches based on support vector regression, Gaussian process regression, and neural networks, which allow for complex nonlinear effects and variable operating conditions to be taken into account. The methods considered are classified by type of mathematical model, identification algorithm, source of input data, and suitability for use in ship motion control systems. It is shown that traditional model-oriented approaches are characterized by physically interpretable parameters but have limited accuracy and adaptability in real sailing conditions. Modern data-oriented and intelligent methods, on the contrary, provide increased accuracy and adaptability, but are accompanied by increased computational complexity and problems with the interpretability of results. Based on the analysis, the feasibility of developing hybrid (grey-box) approaches that combine physically based mathematical models with adaptive data-oriented algorithms is justified. It is noted that such approaches are promising for integration into decision support systems, digital ship twins, and intelligent navigation complexes. The results obtained create scientific prerequisites for further research aimed at developing adaptive methods for identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering using operational navigation data and improving the efficiency of motion control in real operating conditions.

Keywords: ship maneuvering, dynamic characteristics, parameter identification, ship motion control, mathematical modeling, adaptive methods, data-driven approaches, hybrid models.

References

- [1] M. Zhu, A. Hahn, Y. Wen, and A. Bolles, "Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines," *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, The TransNav*, vol. 11, no. 1, pp. 23-29, 2017. doi: [10.12716/1001.11.01.01](https://doi.org/10.12716/1001.11.01.01).
- [2] S. Ivanov, V. Teut, and P. Oliynyk, "Identyfikatsiia parametriv matematychnoi modeli sudna dlia zabezpechennia avtomatychnoho ke-ruvannia v umovakh perekhodu" ["Identification of ship mathematical model parameters for support of automatic control in voyage conditions"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 4(75), pp. 32-36, 2015. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42139](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42139). (Ukr.)
- [3] C. Song, X. Zhang, and G. Zhang, "Nonlinear Identification for 4-DOF Ship Maneuvering Modeling via Full-Scale Trial Data," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 2, pp. 1829-1835, 2022. doi: [10.1109/TIE.2021.3062255](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3062255).
- [4] W. Guan, H. Peng, X. Zhang, and H. Sun, "Ship Steering Adaptive CGS Control Based on EKF Identification Method," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, article 294, 2022. doi: [10.3390/jmse10020294](https://doi.org/10.3390/jmse10020294).
- [5] H. D. Nguyen, "Recursive identification of ship manoeuvring dynamics and hydrodynamics," *ANZIAM Journal*, vol. 49, pp. 717-732, 2008. doi: [10.21914/anziamj.v49i0.358](https://doi.org/10.21914/anziamj.v49i0.358).
- [6] X. Sun, D. Mu, X. Song, D. Zhang, J. Shao, and Y. An, "Online Identification Method for Motion Model Parameters of Unmanned Surface Vehicle," in *Proc. of the 37th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC)*, Xiamen, China, May 16-19, 2025,

- pp. 1681-1685. doi: **10.1109/CCDC65474.2025.11090779**.
- [7] W. Bai, J. Ren, and T. Li, "Multi-Innovation Gradient Iterative Locally Weighted Learning Identification for A Nonlinear Ship Maneuvering System," *China Ocean Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 288-300, 2018. doi: **10.1007/s13344-018-0030-0**.
- [8] C. Chen et al., "Ship Manoeuvring Model Parameter Identification Using Intelligent Machine Learning Method and the Beetle Antennae Search Algorithm," in *Proc. of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, June 9-14, 2019, article V07BT06A028. doi: **10.1115/OMAE2019-95565**.
- [9] Y. Zhong, C. Yu, G. Xiang, J. Cao, X. Xiang, and L. Lian, "A Constrained Least Squares Algorithm for Maneuvering Dynamics Identification of Marine Crafts," in *Proc. of the 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, July 24-26, 2023, pp. 1379-1384. doi: **10.23919/CCC58697.2023.10240564**.
- [10] B. Liu, Y. Jin, A.R. Magee, L.J. Yiew, and S. Zhang, "System Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion Based on ϵ -Support Vector Regression," in *Proc. of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Glasgow, Scotland, UK, June 9-14, article V07AT06A067. doi: **10.1115/OMAE2019-96699**.
- [11] Y. Xue, Y. Liu, G. Xue, and G. Chen, "Identification and Prediction of Ship Maneuvering Motion Based on a Gaussian Process with Uncertainty Propagation," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 8, article 804, 2021. doi: **10.3390/jmse9080804**.
- [12] Z. Zhang, and J. Ren, "Locally Weighted Non-Parametric Modeling of Ship Maneuvering Motion Based on Sparse Gaussian Process," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 6, article 606, 2021. doi: **10.3390/jmse9060606**.
- [13] Z. Hong, X. Wang, M. Li, Y. Gu, J. Zhao, and X. Cao, "Identification of USV Maneuvering Model Based on Multi-Output Gaussian Process Regression," in *Proc. of the China Automation Congress (CAC)*, Chongqing, China, Nov. 17-19, 2023, pp. 6300-6305. doi: **10.1109/CAC59555.2023.10451338**.
- [14] P. Zhang, J. Liu, L. Xie, and S. Li, "Dynamic system identification of underactuated ship dynamics based on Gaussian process regression," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Wuhan, China, Oct. 22-24, 2021, pp. 954-960. doi: **10.1109/ICTIS54573.2021.9798415**.
- [15] Y. Jiang, X.-R. Hou, X.-G. Wang, Z.-H. Wang, Z.-L. Yang, and Z.-J. Zou, "Identification modeling and prediction of ship maneuvering motion based on LSTM deep neural network," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 125-137, 2022. doi: **10.1007/s00773-021-00819-9**.
- [16] N. Wang, H. Wu, Y. Zhang, J. Song, Y. Lin, and L. Hao, "Self-organizing data-driven prediction model of ship maneuvering fast-dynamics," *Ocean Engineering*, vol. 288, article 115989, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115989**.
- [17] S.Y. Li, J. Xiang, and G.H. Xia, "Enhancing Ship Maneuvering Models through Hybrid Integration of Data-Driven Velocity Calibrator for Improved Performance," in *Proc. of the OCEANS 2024 – Singapore*, Singapore, Singapore, April 15-18, 2024, pp. 1-6. doi: **10.1109/OCEANS51537.2024.10682323**.
- [18] T. Wang, G. Li, L.I. Hatledal, R. Skulstad, V. AEsøy, and H. Zhang, "Incorporating Approximate Dynamics Into Data-Driven Calibrator: A Representative Model for Ship Maneuvering Prediction," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1781-1789, 2022. doi: **10.1109/TII.2021.3088404**.
- [19] L. Jiang, X. Shang, B. Jin, C. Ji, and Z. Zhang, "Multi-objective optimal input design for grey-box identification modelling of ship manoeuvring motion," *Ships and Offshore Structures*, vol. 20, no. 2, pp. 178-187, 2025. doi: **10.1080/17445302.2024.2335452**.
- [20] Y. Yu, H. Hao, Z. Wang, Y. Peng, and S. Xie, "Online prediction of ship maneuvering motions based on adaptive weighted ensemble learning under dynamic changes," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 18, no. 1, article 2341922, 2024. doi: **10.1080/19942060.2024.2341922**.

Стаття надійшла 13.10.2025

Стаття прийнята 02.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Лесневський В. М., Калініченко Є. В. Аналіз сучасних підходів до ідентифікації динамічних характеристик маневрування суден. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 197-204. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>.