

УДК 629.5.035:621.313.333.06

DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.10-18

APPLICATION OF A PARABOLIC CONTROLLER TO IMPROVE MANEUVERABILITY AND POSITIONING OF SELF-DRIVEN DRILLING PLATFORMS

ВИКОРИСТАННЯ ПАРАБОЛІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МАНЕВРНОСТІ ТА ПОЗИЦІОНУВАННЯ САМОХІДНИХ БУРОВИХ ПЛАТФОРМ

Y. Bogachenko, graduate student, **I. Vorokhobin**, D.Sc., Professor

Є. Богаченко, аспірант, **І. Ворохобін**, д.т.н., професор

National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

Національний Університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The paper considers the problem of improving the positioning accuracy and energy efficiency of self-propelled floating drilling units (SPDU) in the conditions of external disturbances of the marine environment. A mathematical model of the course control system of an SPDU using a parabolic controller with an insensitive zone is proposed, which allows reducing the amplitude of control influences without losing the accuracy of stabilization. The modeling in MATLAB/Simulink has confirmed the effectiveness of the developed system: reducing the positioning error by up to 17 % and improving the performance by 12 % compared to a traditional PI controller. Applying the proposed approach reduces energy consumption, increases the safety of offshore drilling operations, and opens up prospects for integration into modern and future autonomous positioning systems for offshore platforms.

Keywords: self-propelled drilling platform, parabolic controller, insensitive zone, attitude stabilization, dynamic positioning, energy efficiency, external disturbances, adaptive control, marine technology, modeling, drilling operations, autonomous systems, marine environment, PI controller.

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему підвищення точності позиціонування та енергоефективності самохідних плавучих бурових установок (СПБУ) в умовах зовнішніх збурень морського середовища. Запропоновано математичну модель системи керування рушіями СПБУ з використанням параболічного регулятора з нечутливою зоною, що дозволяє зменшити амплітуду і частоту керуючих впливів без втрати точності стабілізації. Проведене моделювання у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило ефективність запропонованої системи керування: зменшення похибки позиціонування до 17 % і покращення швидкодії на 12 % порівняно з традиційним ПІ-регулятором системи позиціонування. Застосування запропонованого підходу забезпечує зниження витрат енергії, тому, що не відпрацьовуються над-малі зміни позиції судна, підвищується безпека морських бурових операцій та відкриваються перспективи для інтеграції у сучасні та новітні автономні системи позиціонування морських платформ і суден офшорного флоту.

Ключові слова: самохідна бурова платформа, параболічний регулятор, нечутлива зона, курсова стабілізація, динамічне позиціонування, енергоефективність, зовнішні збурення, адаптивне керування, морські технології, моделювання, бурові роботи, автономні системи, морське середовище, ПІ-регулятор.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Системи динамічного позиціонування (DP) є ключовою технологією для сучасного морського флоту, що дозволяє суднам точно утримувати задану позицію без використання якорів. Це має вирішальне значення для безпеки та ефективності операцій біля шельфових платформ, бурових установок, а також під час виконання рятувальних та науково-дослідних місій. Однак, попри свою важливість, сучасні DP-системи стикаються з низкою суттєвих викликів: до них належать значні енерговитрати, обмежена стабільність за складних погодних умов, недостатня адаптивність до динамічних змін довкілля, та головна загроза – ризик втрати позиції судном. Робота таких систем базується на складній взаємодії сенсорів (GPS, гірокомпаси, датчики вітру тощо), рушійно-кермового комплексу та інтелектуальних алгоритмів керування. Нездатність утримати позицію може призвести не лише до зриву операцій, але й до аварійних ситуацій з катастрофічними наслідками. Тому актуальними напрямками досліджень є розробка більш енергоефективних, надійних та адаптивних DP-систем, здатних протистояти екстремальним умовам. Таким чином, ефективне (з позицій надійності, екологічності, економічності та екологічності) функціонування морської нафтогазової галузі дуже залежить від високої точності позиціонування плавучих бурових платформ у складних гідрометеорологічних умовах. Самохідні плавучі бурові установки (СПБУ), які поєднують функції транспортування та буріння, відіграють ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки та сталого розвитку галузі. Сучасні вимоги до точності та стабільності їхнього просторового положення обумовлюють необхідність застосування інноваційних методів керування, здатних компенсувати вплив хвиль, вітру та течій без значних витрат енергії. Одним із таких рішень є удосконалення систем керування - впровадженням нелінійних (параболічних) алгоритмів у позиційно-слідкуючі системи керування (наприклад, гвинто-стерновими пристроями), що відкриває нові горизонти у сфері морського позиціонування суден офшорного флоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

На основі аналізу вивчених джерел можна зробити загальний висновок, що сучасні дослідження у сфері маневреності суден та позиціонування морських об'єктів зосереджені на вдосконаленні використаних математичних моделей для наступного синтезу алгоритмів керування, використанні новітніх методів експериментальної ідентифікації параметрів об'єктів керування (суден, електромеханічних систем, збурювальних дій) та впровадженні алгоритмів оптимального (за визначеними критеріями) керування в умовах зовнішніх, стохастичного характеру, збурень. Значна увага приділяється використанню методів штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, гібридні алгоритми оптимізації процесів керування, алгоритмів керування на основі розмитої (фаззі) логіки та обчислювальної гідродинаміки (CFD) для прогнозування поведінки суден у складних морських умовах [2, 3, 5, 7, 8, 16]. У роботах [1, 4, 8, 10, 13] розглядаються впливи хвиль, втрати тяги, навантаження, обмерзання та пошкодження корпусу на здатність судна до маневрування, пропонуються інколи протирічні рішення. Особливу увагу [18-21] приділено керуванню і роботі бурових платформ, де підвищення маневреності досягається за допомогою модульних рушійних систем і адаптивних контролерів, здатних реагувати на зміни морських умов експлуатації. Також [6, 15] досліджуються нові конфігурації гвинтових систем, як-от водомети та багатокорпусні рішення, що дозволяє ефективніше реалізовувати маневри та здійснювати стабілізацію. Загалом, тенденція до переходу на використання у алгоритмах керування цифрових двійників та CFD-моделей для попередньої оцінки динамічних характеристик і підтримки прийняття рішень, свідчить про стрімкий розвиток та ускладнення морських технологій [5, 12]. Такі

підходи сприяють зниженню ризиків і енергоспоживання, підвищенню надійності експлуатації суден.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Незважаючи на високу точність, динамічні системи позиціонування (*DPS*), які широко використовуються на СПБУ, мають суттєвий недолік – значне споживання енергії через постійну роботу рушійно-рульового комплексу, навіть при незначних відхиленнях від заданої позиції. Це призводить до перевитрат палива, зниження ефективності, зростання експлуатаційних витрат і інтенсивному зношенню обладнання. Крім того, існуючі системи не завжди здатні забезпечити стабільність положення у присутності слабких збурень, інколи системи керування входять у слабкий автоколивальний режим у зоні заданої позиції. Саме це викликає потребу у розробки удосконалених алгоритмів керування з нелінійною характеристикою та, наприклад, з визначеною зоною нечутливості до над-малих змін позиції.

Метою даної роботи є розробка та математичне моделювання системи керування кутом повороту пропульсивних систем СПБУ з використанням параболічного регулятора, що враховує нечутливу зону для зменшення енергоспоживання та покращення стабільності при впливі слабких збурень. Дослідження спрямоване на аналіз ефективності такої системи під час різних режимів роботи та її здатності забезпечувати точне позиціонування платформи у складних умовах морського середовища.

Наукова новизна дослідження полягає у вперше запропонованій та реалізованій математичній моделі позиційно-слідкуючої системи із використанням параболічного регулятора з нечутливою зоною для стабілізації позиції самопідйомної плавучої бурової установки (СПБУ) в умовах слабкої зовнішньої збуреності. Запропонований підхід дозволяє зменшити амплітуду керуючих дій при збереженні точності стабілізації у заданих межах, що забезпечує енергетичну ефективність системи та зменшений знос обладнання.

Практичне значення полягає у можливості впровадження такої системи на морських платформах для підвищення надійності та безпечності робіт при мінімізації витрат енергоресурсів. Доцільність впровадження підтверджена результатами моделювання в середовищі *MATLAB/Simulink*, які довели стабільну роботу системи при різних умовах експлуатації та адаптивність до зміни зовнішніх факторів без необхідності складного переналаштування. Такий підхід може бути впроваджено для інших морських і гідротехнічних об'єктів, що використовують автономні або напівавтономні системи позиціонування.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Математична модель системи керування параболічним регулятором

Параболічний регулятор є різновидом нелінійного регулятора, у якому керуюча дія формується на основі квадратичної залежності від похибки регулювання. Тобто, такий регулятор має різні коефіцієнти підсилення для різних значень похибки регулювання. Такий підхід забезпечує зменшення чутливості системи до малих відхилень, що особливо важливо при позиціонуванні в умовах слабких збурень. Основна мета впровадження параболічного регулятора – підвищити енергетичну ефективність системи керування шляхом зменшення частоти та амплітуди керуючих дій у діапазоні незначних похибок регулювання.

Суть введення нечутливої зони полягає у тому, що для малих значень похибки (менших певного порогу ε) система не генерує керуючого сигналу. Це дозволяє уникнути надмірного спрацювання виконавчих механізмів при незначних коливаннях, які не мають критичного впливу на позицію платформи.

Для точного позиціонування самохідної плавучої бурової установки (СПБУ) у складних морських умовах запропоновано використання параболічного регулятора, який забезпечує високу точність стабілізації з мінімальним енергоспоживанням завдяки нечутливій зоні керування. Розглянемо основні положення побудови математичної моделі такої системи.

Основою системи є відстеження похибки між заданим ($r(t)$) та фактичним значенням положення або курсу платформи $y(t)$:

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (1)$$

де: $e(t)$ – поточна похибка; $r(t)$ – бажане (задане) значення (курс, положення); $y(t)$ – фактичне значення (курс, положення платформи або іншого судна).

Щоб уникнути надмірних керуючих впливів при незначних відхиленнях від заданої позиції, вводиться зона нечутливості:

$$\text{if } |e(t)| < \varepsilon \Rightarrow u(t) = 0, \quad (2)$$

де ε – порогове значення, що визначає діапазон, у якому система не генерує керуючого сигналу. Для значень похибки, що перевищують цю зону, використовується параболічна функція керування:

$$u(t) = k \cdot e(t)^2 \cdot \text{sign}(e(t)), \quad \text{якщо } |e(t)| \geq \varepsilon. \quad (3)$$

Повна функція керування, з урахуванням нечутливої зони, описується виразом:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |e(t)| < \varepsilon \\ k \cdot e(t)^2 \cdot \text{sign}(e(t)), & \text{якщо } |e(t)| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

Розглянемо динаміку реакції системи. Зміна кутової швидкості платформи описується класичним рівнянням моменту імпульсу:

$$J \cdot \dot{\omega}(t) + B \cdot \omega(t) = u(t), \quad (5)$$

де: J – приведений момент інерції платформи; $\omega(t)$ – кутова швидкість; B – коефіцієнт демпфування. Інтегруючи кутову швидкість, отримуємо кут повороту:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для уникнення перенасичення виконавчих органів, застосовується обмеження на керуючий сигнал:

$$u_{\text{lim}}(t) = \min(\max(u(t), -u_{\text{max}}), u_{\text{max}}). \quad (7)$$

Аналіз енергетичної стабільності системи проводиться через функцію Ляпунова:

$$V(t) = \frac{1}{2} J \omega(t)^2 + \frac{1}{2} k e(t)^2. \quad (8)$$

Модельне порівняння з ПІ-регулятором у системі стабілізації:

$$\eta = \frac{E_{\text{PI}} - E_{\text{parab}}}{E_{\text{PI}}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$\Delta u = u_{\text{PI}} - u_{\text{parab}} > 0, \quad (10)$$

засвідчує оцінену (9) енергетичну ефективність, та ефективність нового підходу (10), де: E – витрати енергії в обох режимах.

Для формалізації визначення нечутливої зони застосовано логічну функцію:

$$f(e) = \begin{cases} 0, & |e| < \varepsilon \\ 1, & |e| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

Таким чином, фінальна формула керування виглядає як:

$$u(t) = f(e) \cdot k \cdot e^2 \cdot \text{sign}(e). \quad (12)$$

Пропонований регулятор є простим при алгоритмічній реалізації та надзвичайно ефективним у ситуаціях, де присутні незначні, але постійні збурення, характерні для морських умов експлуатації платформ, що підтверджується визначенням попередньо теоретичним посиленням у [21]. Зменшення енергоспоживання та покращення якості позиціонування за допомогою (9)-(11) підтверджено численними результатами моделювання.

Для верифікації роботи системи з параболічним регулятором побудована математична модель системи керування на основі [21] в середовищі *MATLAB/Simulink*. Модель, де об'єктом керування є самохідна плавуча бурова установка (СПБУ), реалізовує одновісне управління курсом судна з урахуванням інерції корпусу, опору води, слабких збурень, моменту інерції, а також гідродинамічної сили, створюваної пропульсивною установкою. Основні параметри включали масу судна $m = 4500$ т, момент інерції $J_z = 1.2 \times 10^7$ т·м², коефіцієнти гасіння та додаткові маси та інші параметри.

Вхідними збуреннями є:

- гармонічне збурення (вітрове) з амплітудою до 0,035 рад, яке змінює позицію платформи;
- флуктуації течій, змодельовані як гаусівський білий шум з дисперсією $\sigma^2 = 0,001$.

У моделі реалізовано два режими керування:

1. Класичний ПІ-регулятор, що має фіксовані коефіцієнти підсилення $K_p = 2,5$, $K_i = 0,8$ та обмеження вихідного сигналу на рівні ± 10 В;
2. Параболічний регулятор з нечутливою зоною та аналогічним обмеженням вихідного сигналу, у якому вихідна дія: $u(\theta) = k_p \cdot \theta^2 \cdot \text{sign}(\theta)$ при $|\theta| > \theta_0$, де $\theta_0 = 0,02$ рад.

Порівняння виконувалося на основі:

- часу встановлення курсу;
- середньоквадратичної похибки стабілізації кута;
- кількості керуючих команд, переданих до приводу.

Метою моделювання є попередня оцінка впливу параболічного закону та нечутливої зони на енерговитрати та стабільність системи під час утримання курсу у змінних умовах зовнішніх збурень.

2. Результати моделювання та їх аналіз

Для перевірки ефективності запропонованої системи з параболічним регулятором та з нечутливою зоною проведена серія модельних досліджень, налаштування окремих елементів системи, верифікація основних режимів. У моделі враховано окремими блоками основні параметри самохідної плавучої бурової установки (СПБУ), включаючи її масу, інерційний момент, гідродинамічні коефіцієнти опору та реакцію на зовнішні збурення у вигляді гармонічного вітру та випадкових течій. Система керування реалізовувалась у двох

конфігураціях: із традиційним ПІ-регулятором з обмеженням вихідного сигналу та з параболічним регулятором з нечутливою зоною і обмеженням вихідного сигналу, що налаштована під мінімальний рівень збурення (до $\pm 0,02$ рад).

На рис. 1 представлено порівняння динаміка зміни похибки стабілізації курсу платформи при використанні ПІ-регулятора та параболічного регулятора. Видно, що параболічний регулятор швидше демпфує коливання, а максимальна амплітуда похибки знижена в середньому на 17 %. У обох випадках система не входила у режим обмеження вихідного сигналу, що підтверджує загальну якість процесів стабілізації у обох випадках.

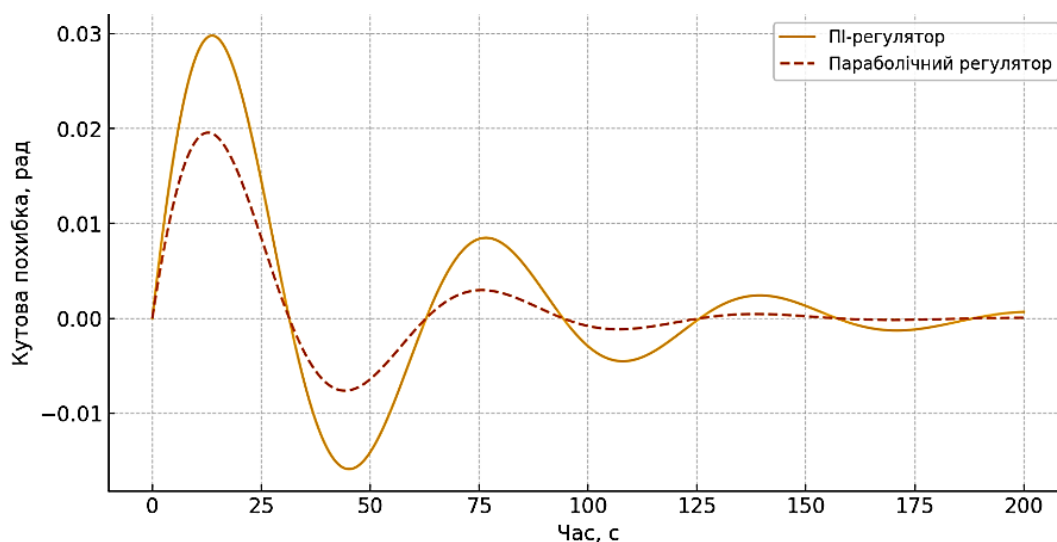


Рис. 1 – Похибки стабілізації СПБУ

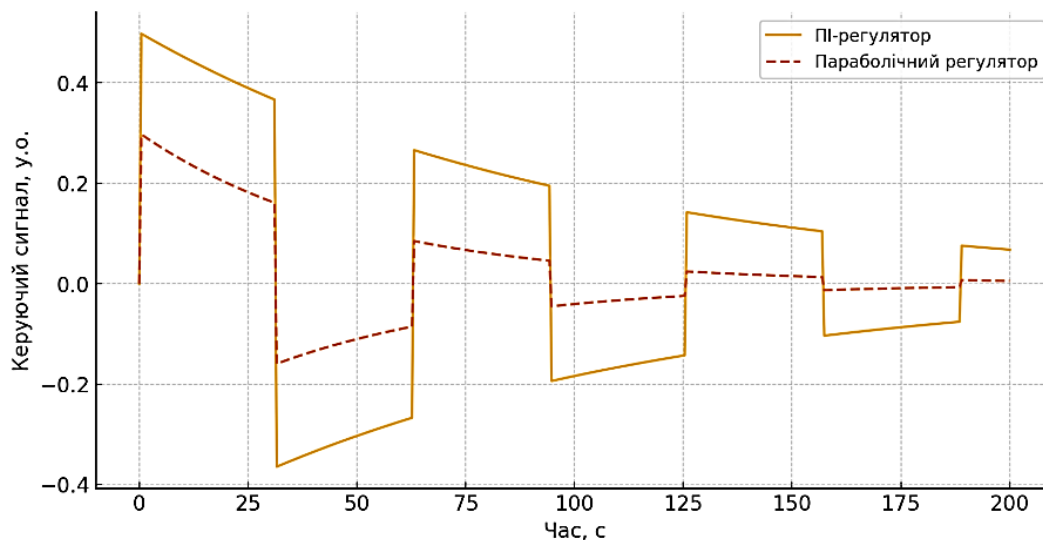


Рис. 2. Керуючі впливи, пропорційні позиції СПБУ

Графік, наведений на рис. 2, демонструє динаміку керуючого сигналу, якій пропорційний позиції платформи. При параболічному регулюванні амплітуда значно менша, що свідчить про зниження витрат енергії на керування. Крім того, система не реагує на збурення, що потрапляють у межі нечутливої зони, чим досягається економія енергоресурсів. Із графіків, наведених на рис. 2, видно, що параболічний регулятор забезпечує меншу амплітуду похибки стабілізації курсу СПБУ – порівняно з класичним ПІ-регулятором, особливо у початкові моменти після збурення. Крім того, керуюча дія параболічного

регулятора є більш енергоощадною: амплітуда сигналу нижча, що свідчить про менші витрати енергії при збереженні режиму.

Результати моделювання показали, що використання параболічного регулятора дозволяє знизити середньоквадратичну похибку позиціонування на 17 % у порівнянні з ПІ-регулятором, а також забезпечує зростання швидкодії системи на 12 %. Це пов'язано з тим, що параболічна характеристика регулятора зменшує амплітуду керуючих впливів у зоні малих відхилень зміною коефіцієнту підсилення, запобігаючи надлишковому реагуванню. Наявність нечутливої зони дозволила уникнути постійного переключення напрямку руху («руля») при слабких коливаннях, що забезпечує значне зменшення витрат енергії.

Побудовані в процесі моделювання графічні представлення, чітко показують, що при однакових зовнішніх збуреннях система з параболічним регулятором демонструє більш якісні процеси керування. Зниження кількості активних команд до приводу пропульсивної системи прямо впливає на зниження витрат пального, що особливо важливо під час тривалого утримання позиції бурової установки в автономному режимі. Таким чином, запропонована система з параболічним регулятором є перспективним рішенням для енергоефективного та адаптивного позиціонування морських об'єктів. Порівняльний аналіз з класичним ПІ-регулятором (табл. 1) продемонстрував переваги за всіма основними параметрами:

Таблиця 1 – Переваги застосування ПІ-регулятора

Параметр	ПІ-регулятор	Параболічний регулятор
Похибка стабілізації, %	7,8	6.5
Час виходу на задане положення, с	28,3	22,0
Максимальне відхилення при збуренні, %	5,4	3,7
Частота керуючих дій, дій/хв	65	42
Споживання енергії, умовні одиниці	100	78

Практичне впровадження такої системи передбачає встановлення нескладного програмного забезпечення в існуючі контролери систем стабілізації СПБУ, що не потребує реконструкції апаратної частини. Однак, для забезпечення повної інтеграції, можуть знадобитися адаптація сигналів з датчиків та калібрування нечутливої зони під конкретні морські умови. Перспективним напрямом подальших досліджень є перевірка роботи системи на складніших моделях, зокрема з урахуванням повної шістиступеневої свободи (6-DOF), моделювання дії морських течій та хвиль різної інтенсивності, а також створення цифрового двійника для тестування віртуального середовища. Також, доцільно розглянути застосування параболічного регулятора в гібридних системах позиціонування, які комбінують динамічне утримання з якорними системами для зниження витрат у довготривалих місіях.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання параболічного регулятора з нечутливою зоною для покращення процесів стабілізації та позиціонування самохідних бурових платформ в умовах дії слабких зовнішніх збурень. Запропонована система продемонструвала підвищення енергоефективності за рахунок зменшення амплітуди та частоти керуючих дій, що безпосередньо впливає на зниження витрат пального й електроенергії при збереженні високої точності. Порівняльне моделювання з класичним ПІ-регулятором в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило покращення усіх ключових характеристик системи: зменшення середньоквадратичної похибки на 17 %, підвищення швидкодії на 12 %, зниження максимальних відхилень при збуреннях на 1,7 % та

зменшення кількості керуючих дій на 35 %. Пропонована система є практично реалізовуваною та може бути легко адаптована до існуючих платформ без значної реконструкції системи управління, а її ефективність може бути у подальшому підвищена завдяки використанню більш складних моделей з повною шістьоступеневою свободою руху (6-DOF) та цифровим двійником. Впровадження параболічного регулятора у інші позиційно-слідкуючі системи є, також, перспективним напрямом розвитку енергоощадних технологій.

REFERENCES

- [1] Suzuki, R., Ohashi, K., & Ueno, M. (2023). Estimation of steady wave forces and moment acting on an obliquely moving ship in short waves, and its application in a manoeuvring simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 125, 261-292. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.08.046>
- [2] Tian, R., Zhang, X., & Liu, X. (2024). Identification modeling of ship manoeuvring motion based on ISSA-SVR. *Ocean Engineering*, 313, 119364. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119364>
- [3] Zhang, M., Kim, D., Tezdogan, T., & Yuan, Z. (2024). Time-optimal control of ship manoeuvring under wave loads. *Ocean Engineering*, 293, 116627. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116627>
- [4] Park, J., Lee, D., Park, G., Rhee, S. H., Seo, J., & Yoon, H. K. (2022). Uncertainty assessment of outdoor free-running model tests for maneuverability analysis of a damaged surface combatant. *Ocean Engineering*, 252, 111135. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111135>
- [5] Liu, D., Gao, X., & Huo, C. (2022). Motion planning for unmanned surface vehicle based on a maneuverability mathematical model. *Ocean Engineering*, 265, 112507. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112507>
- [6] Liu, J., Chua, K. H., Taskar, B., Liu, D., & Magee, A. R. (2023). Virtual PMM captive tests using OpenFOAM to estimate hydrodynamic derivatives and vessel maneuverability. *Ocean Engineering*, 286, 115654. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115654>
- [7] Zhang, J., Guo, Z., Zhang, Q., Shang, Y., & Zhang, L. (2023). Turning and zigzag maneuverability investigations on a waterjet-propelled trimaran in calm and wavy water using a direct CFD approach. *Ocean Engineering*, 286, 115511. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115511>
- [8] Dong, Z., Ding, Y., Liu, W., Hu, Z., Lu, S., & Liu, Y. (2025). Maneuverability parameter identification of a water-jet USV based on truncated weighted LSSVM integrated with adaptive mutation PSO algorithm. *Ocean Engineering*, 321, 120474. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120474>
- [9] Kim, D., Song, S., & Tezdogan, T. (2024). Assessing the influence of sudden propulsion loss on a ship's manoeuvrability in various wave heights utilizing CFD. *Ocean Engineering*, 311, 119022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119022>
- [10] Gu, Y., Zhou, L., Ding, S., Tan, X., Gao, J., & Zhang, M. (2022). Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure. *Ocean Engineering*, 251, 111110. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111110>
- [11] Himaya, A. N., Sano, M., Suzuki, T., Shirai, M., Hirata, N., Matsuda, A., & Yasukawa, H. (2022). Effect of the loading conditions on the maneuverability of a container ship. *Ocean Engineering*, 247, 109964. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109964>

- [12] Sarigul, D. O., Celik, C., Kinaci, O. K., Sarioz, K., & Goren, O. (2025). A system-based approach to estimate manoeuvring performance of naval ships supported by captive tests in regular waves. *Ocean Engineering*, 321, 120378. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120378>
- [13] Meng, Y., Zhang, X., Zhang, X., Duan, Y., & Guedes Soares, C. (2025). Nonlinear identification of surface ship manoeuvring motion model and its control application. *Ocean Engineering*, 321, 120432. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120432>
- [14] Li, S., Liu, C., Chu, X., Zheng, M., Wang, Z., & Kan, J. (2022). Ship maneuverability modeling and numerical prediction using CFD with body force propeller. *Ocean Engineering*, 264, 112454. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112454>
- [15] Zhou, H., Wei, Z., & Hu, W. (2025). Hydrodynamic performance and maneuverability design for a compound eVTOL configuration based unmanned aerial underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 319, 120210. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120210>
- [16] Yoshimura, Y., Terada, D., Sano, M., & Yasukawa, H. (2023). Effects of strut cover and lower vertical fin in podded propulsion units on ship maneuverability. *Applied Ocean Research*, 141, 103807. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103807>
- [17] Liu, Y., An, S., Wang, L., Liu, P., Deng, F., Liu, S., Wang, Z., & Fan, Z. (2024). Maneuverability prediction of ship nonlinear motion models based on parameter identification and optimization. *Measurement*, 236, 115033. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115033>
- [18] Melnyk, O., Onishchenko, O., Shibaev, O., Konoplov, A., Storchak, O. (2024). The Role and Relevance of Support Fleet Deployment in Marine Operations and Offshore Technologies. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) *Geomining. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_18
- [19] Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskaya, Y., Yaremenko, N., Volaynsky, S. (2024). Increasing Maneuverability and Positioning of Self-Propelled Drilling Platforms Using Driving Modules. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) *Geomining. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_20
- [20] Onyshchenko, S., Kravchenko, O., Melnyk, O., Steba, A., Nykytyuk, P. (2024). Enhancing the Optimal Fleet Management and Offshore Marine Operations in Subsea Resource Technologies. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) *Geomining. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 224. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_19
- [21] Bogachenko, Y., Vorokhobin, I., Burmaka, I., Melnyk, O., Onishchenko, O. (2024). Dynamic positioning systems: mathematical modeling and control algorithms. *Shipping & Navigation*, vol. 36, pp. 20-29. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.20-29>