

УДК 681.52

DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.4.67.3>

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КУРСОМ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО КАТЕРА

Андрій Войтасик

кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, andrii.voitasyk@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9409-6108**Ігор Сабуцький**

аспірант,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, sabutskyi1994@gmail.com

ORCID: 0009-0001-6045-3250

Безекіпажний надводний катер є інноваційним рішенням для морської галузі, де відсутність екіпажу значно знижує експлуатаційні витрати та підвищує безпеку проведення місій. Морський рухомий об'єкт може бути оснащений різноманітними технологіями для автоматичного керування, що дає змогу забезпечити точність і правильність руху навіть за складних погодних умов. Вирішення одного з таких завдань виконує система автоматичного керування курсом, яка відповідає за коригування напрямку руху відповідно до впливу зовнішніх чинників. Метою статті є розробка системи автоматичного керування курсу безекіпажного надводного катера із застосуванням нечіткого регулятора. Методом математичного моделювання було реалізовано систему автоматичного керування рухом безекіпажного надводного катера зі стабілізацією курсу. Моделювання поведінки морського рухомого об'єкта виконано у вигляді еліпсоїда обертання у трьохмірній площині. У статті описано кілька варіантів використання електрорушійних пристроїв безекіпажного надводного катера в різних режимах його роботи. Розроблено систему автоматичного керування курсом, яка використовує нечітку логіку для коригування сигналів, що подаються на електрорушійні пристрої. Прийняті технічні рішення дають можливість зменшити похибки в курсі катера під час його руху, як в умовах постійного, так і динамічно змінного горизонтального руху. Отримав подальший розвиток принцип автоматичного керування безекіпажним надводним катером із впровадженням системи автоматичного керування курсом морського рухомого об'єкта, що забезпечує стабільність руху під час різних режимів експлуатації. Зокрема, представлена конфігурація рушійно-кермового комплексу безекіпажного надводного катера, яка дає змогу ефективно виконувати маневрування на морській поверхні. Результати моделювання показали ефективність системи автоматичного керування курсом, яка може працювати у двох режимах підтримання бажаного курсу: забезпечуючи підтримку максимальної маршової швидкості руху та регулювання в межах допустимих маршових швидкостей руху.

Ключові слова: безекіпажний надводний катер, система автоматичного керування, електрорушійний пристрій, регулятор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Розвиток технологій у сфері морської робототехніки сприяє підвищенню ефективності виконання різноманітних завдань у водному середовищі, включно з охороною та моніторингом об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема, до виконання таких операцій, як патрулювання, спостереження, навігації та транспортування, залучають безекіпажні надводні катери (БНК, в англomовній літературі – Unmanned surface vessels, USV). За точність руху БНК у водному середовищі відповідає його система автоматичного керування (САК). Передусім САК відповідає за рух БНК заданим

курсом, підлаштовуючи параметри керування до впливу зовнішніх чинників: вітру, течії, хвилювання поверхні тощо. Керування курсом БНК є процесом, який забезпечує ефективне виконання поставлених завдань у складних умовах морського середовища [1, 2]. Під час руху надводного катера виникає потреба у врахуванні впливу зовнішніх чинників на динамічні зміни траєкторії руху об'єкта [3, 4]. Вирішення цієї проблеми потребує стабільної та точної роботи САК курсом, яка забезпечує утримання заданого маршруту руху БНК та підлаштування технологічних параметрів до змінних умов експлуатації

[5]. Особливо актуальним завданням є розробка САК курсом для виконання складних маневрів, як-от повороти в обмеженому просторі, корекція курсу під час маневрів ухилення, а також точне позиціонування під час виконання операцій біля об'єктів інфраструктури [6].

Метою дослідження є розробка системи автоматичного керування курсу безкіпажного надводного катера із застосуванням нечіткого регулятора.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Розробка САК курсом БНК є досить складним завданням, оскільки система має забезпечувати надійне керування у складних умовах морського середовища [7, 8]. Для цього традиційно застосовують пропорційно-інтегральні (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори [9, 10]. Однак такі підходи виявляють обмеження в ситуаціях, коли система стикається з постійними коливаннями чи суттєвою нелінійністю параметрів, що властиво руху БНК у морі під впливом хвиль, вітру та течій. ПІ-регулятори добре підходять для стабілізації стану системи завдяки усуненню статичних похибок, тоді як ПІД-регулятори забезпечують швидший відгук і краще підлаштування до динамічних змін. Однак за наявності суттєвої нелінійності чи непередбачуваних коливань, як-от вплив хвиль або вітру, їхня робота може бути обмеженою через недостатню здатність враховувати складні взаємозв'язки між параметрами системи. У таких випадках результативність роботи традиційних регуляторів може бути недостатньою.

Серед альтернативних методів керування значний інтерес становлять оптимальні, робастні й адаптивні підходи [11, 12]. Оптимальні регулятори дозволяють мінімізувати певні цільові функції, наприклад витрати енергії чи відхилення від заданого курсу, забезпечуючи високий рівень ефективності [13, 14]. Робастні системи, зі свого боку, мають високу стійкість до зовнішніх збурень і неточностей у параметрах, що робить їх особливо актуальними для використання в умовах невизначеності [15, 16]. Адаптивні системи здатні модифікувати свої параметри в режимі реального часу, реагуючи на зміну характеристик середовища або об'єкта керування, що дає змогу досягати кращої продуктивності в широкому діапазоні умов [17, 18]. Окремо слід відзначити регулятори, побудовані на основі нечіткої логіки [19, 20]. Їхня основна перевага полягає у здатності працювати з неточною, розпливчастою або неоднозначною інформацією [21, 22]. На

відміну від класичних регуляторів, вони моделюють процеси на основі правил, які можуть бути інтуїтивно зрозумілими для людини, що дає можливість обробляти складні нелінійні залежності без потреби в детальній математичній моделі. Завдяки цій властивості регулятори на основі нечіткої логіки стають правильним вибором для керування об'єктами, динаміка яких сильно залежить від умов експлуатації, як-от рух БНК у морі. З огляду на це створення САК курсу БНК з використанням регуляторів, заснованих на принципах нечіткої логіки, є перспективним напрямом, що дає можливість підвищити ефективність і стабільність керування катером у різноманітних умовах експлуатації.

У статті завдання розробки САК курсом БНК розглядається на площині, що дає змогу сконцентрувати увагу на забезпеченні стабільності та маневреності катера в умовах різних змін, включно зі зміною курсу та швидкості.

Під час руху БНК використовується рушійно-кермовий комплекс (РКК), який гарантує ефективне маневрування катером у горизонтальній площині. Як виконавчі елементи виступають гребні електрорушійні пристрої (ЕРП). Важливою складовою цієї системи є правильне розташування рушійних пристроїв відносно центру мас (ЦМ) катера, по лівому (ЛБ) та правому бортах (ПБ). Схему розташування цих пристроїв можна побачити на рис. 1.

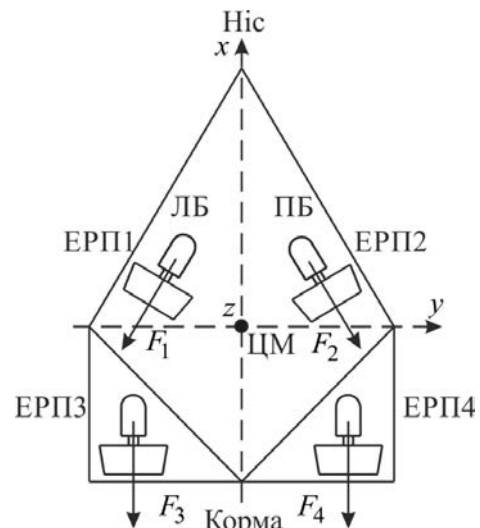


Рис. 1. Конфігурація РКК БНК

Враховуючи схему конфігурації РКК БНК, можна припустити, що вплив гідродинамічного потоку води на ЕРП під час руху буде близьким до ідеального. Отже, катер здатен зберігати ста-

більність у горизонтальному положенні навіть у разі маневрування або змін курсу, що є важливою характеристикою для безекіпажних суден. Така стабільність дає змогу ефективно керувати катером в різних морських умовах.

Застосування ЕРП, розміщених у горизонтальній площині, дає можливість реалізувати ефективне керування БНК у двох основних режимах руху, кожен з яких відповідає специфічним умовам експлуатації. Перший режим – плавний режим руху dm_1 (рис. 2, а, б). Він актуальний за відсутності течії або за наявності слабкої течії, де від катера не вимагається швидка реакція. Другий режим – динамічний режим руху dm_2 (рис. 2, в, г).

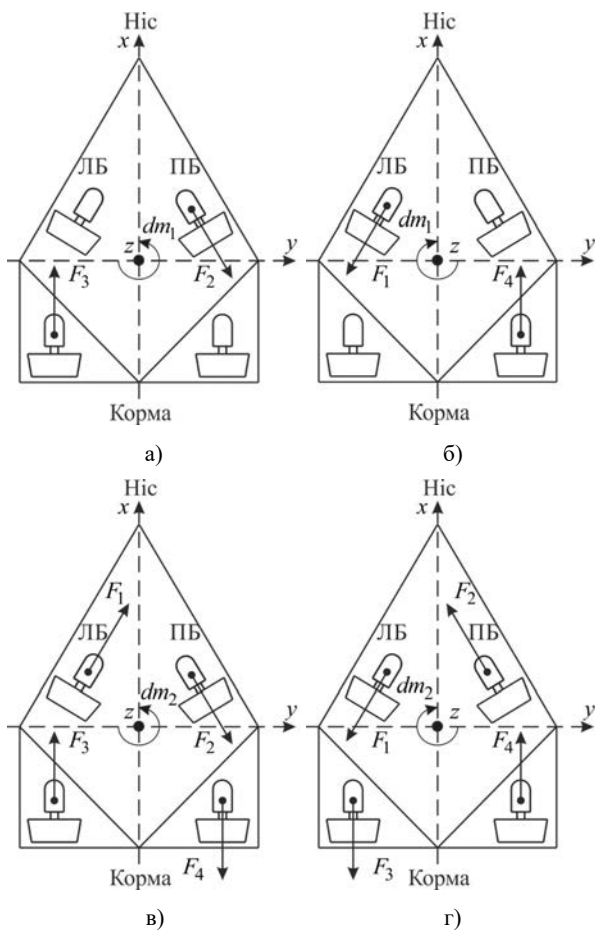


Рис. 2. Схема застосування РКК БНК при поворотах: а), б) – ліворуч / праворуч за плавного руху; в), г) – ліворуч / праворуч за динамічного руху

Цей режим необхідний у разі сильних або середніх течій, коли маневрування катером потребує більш швидкої та точної реакції, що забезпечує високий рівень керованості.

Для досягнення ефективного керування РКК БНК необхідно не лише забезпечити можливість

зміни напрямку прикладання сил упору F_1-F_4 , але й здійснювати точне регулювання величини цих сил відповідно до заданих сигналів керування U , що визначають вибраний режим руху катера dm_1/dm_2 . Для досягнення оптимального керування на рис. 2 показано важливість врахування таких параметрів, як сила упору та регулювання напрямку руху.

Для ефективної роботи САК курсом БНК актуальним вважається не тільки підтримувати заданий напрямок, а й коригувати рух катера за зміни зовнішніх умов, як-от вітер, хвилі чи інші збурення навколишнього середовища. Процес підтримання бажаного курсу БНК може бути організований за допомогою двох основних підходів, кожен з яких має свої переваги в різних умовах експлуатації.

Перший підхід передбачає підтримання курсу БНК за максимальної швидкості руху, що є критичним для виконання завдань, які потребують швидкої реакції та переміщення на великі відстані. У цьому випадку система повинна забезпечувати підтримку курсу навіть за високих швидкостей, зберігаючи при цьому стабільність і безпеку руху. Другий підхід орієнтований на підтриманні курсу в межах допустимих швидкостей, що необхідно для умов, де висока швидкість не є пріоритетною, а точність і стабільність руху мають першочергове значення.

Обидва ці підходи відіграють своє значення в забезпеченні високої маневреності БНК, незалежно від того, чи йдеться про спокійні умови, чи про вплив збурень, як-от хвилі чи вітер. Завдяки такому гнучкому підходу БНК може ефективно виконувати широкий спектр завдань, гарантуючи стабільність руху і точність курсу в різноманітних умовах, що суттєво підвищує ефективність його експлуатації в морському середовищі.

Розглянемо детально два варіанти підтримання курсу БНК, у яких застосовуються різні стратегії використання ЕРП для досягнення стабільного руху в горизонтальній площині. Ці варіанти можна представити в контексті різних режимів руху та регулювання, що мають суттєвий вплив на маневреність і точність підтримки курсу катера в умовах змінної навколишньої ситуації.

У першому варіанті підтримання курсу катера (рис. 3, а) швидкість маршового руху БНК забезпечується сумарною дією сил упору, що виникають від усіх рушійних пристроїв, розташованих у горизонтальній площині катера. У цьому випадку для підтримання заданого курсу досить регулювати силу упору лише одного кормового

рушія ($F_4 = reg$), який розташований у задній частині катера. Інші рушії працюють на максимально можливій потужності (F_1-F_3), що дає змогу досягти найвищої маршової швидкості. Важливою особливістю цього варіанта є те, що сили упору інших рушійних пристроїв залишаються незмінними під час процесу підтримання курсу ($F_1 = F_2 = F_3 = max \& const$), що спрощує керування в умовах стабільного середовища.

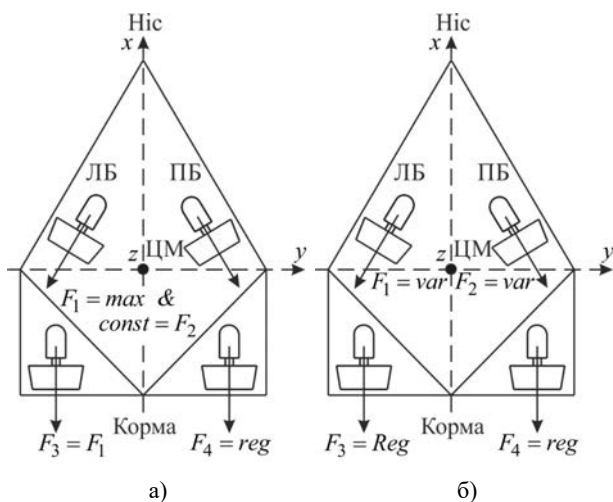


Рис. 3. Схема застосування РКК БНК за підтримання заданого курсу:

а) – з підтримкою максимальної маршової швидкості руху; б) – у діапазоні допустимих маршових швидкостей руху

Другий варіант стабілізації курсу БНК передбачає постійний рух на будь-якій маршовій швидкості в межах допустимих значень, що перебувають нижче за максимальну швидкість (рис. 3, б). У цьому випадку величина сил упору, що створюються рушійними пристроями, може змінюватися залежно від режиму руху, який вибраний на поточний момент ($F_1 = var$; $F_2 = var$). Таким чином, можна забезпечити підлаштування катера в умовах змінної навколишньої ситуації.

Якщо під час руху БНК виникає незначне відхилення від заданого курсу ($\leq 3^\circ$), достатньо регулювати лише один кормовий рушій ($F_4 = reg$), що дає можливість ефективно коригувати курс без значних змін у потужності інших рушіїв. Однак, якщо відхилення курсу суттєве ($> 3^\circ$), для підтримання заданого курсу потрібно залучити додатковий кормовий рушій ($F_3 = Reg$).

Для реалізації та дослідження роботи запропонованих варіантів підтримання курсу БНК можна застосувати спеціалізоване програмне забезпечення, яке дає змогу створювати точні

математичні моделі об'єктів дослідження та САК. Процес комп'ютерного моделювання розпочинається завдяки побудові детальної математичної моделі, яка враховує всі важливі параметри та взаємозв'язки між компонентами системи керування. Одним із найпоширеніших і зручних інструментів для таких завдань є середовище Simulink, що входить до складу пакета MATLAB. Це програмне середовище дає змогу проводити моделювання й дослідження різних варіантів САК з урахуванням специфічних вимог до руху БНК.

Під час розробки моделей у Simulink використовується спеціальна бібліотека блоків, що надає всі необхідні елементи для створення структурних схем систем керування. Бібліотека доступна через командне вікно MATLAB, і після її активації користувач може створити новий робочий лист для побудови відповідної моделі. Завдяки такій бібліотеці можна додавати на робочий лист різноманітні блоки, що відповідають за різні частини САК курсом БНК. Кожен блок виконує конкретну функцію, а їх взаємодія створює єдину САК курсом, що може бути протестована в різних режимах.

Після з'єднання відповідних блоків відповідно до рекомендацій і вимог для стабілізації курсу БНК в підсумку ми отримуємо працюючу модель САК курсом БНК з використанням нечіткої логіки для підтримання заданого значення (рис. 4).

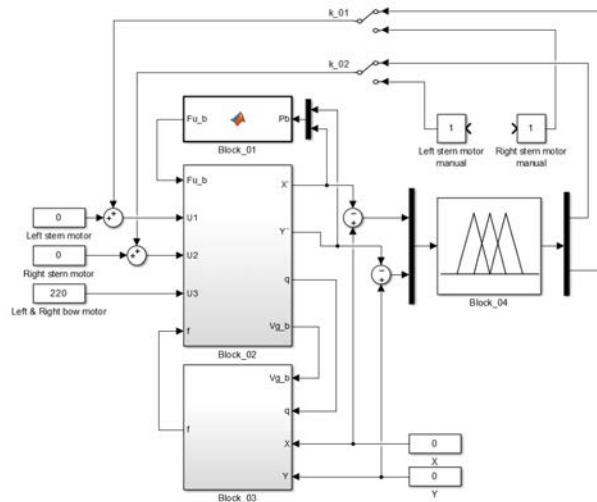


Рис. 4. САК курсом БНК

Створена система дає можливість проводити дослідження в кількох режимах роботи, зокрема:

- режим дистанційного ручного керування маршовим рухом БНК, де оператор самостійно керує рушіями і курсом катера;

– режим автоматичного керування, за якого система здійснює підтримання курсу без втручання оператора, що дає змогу катеру рухатися стабільно в заданому напрямку.

Для перемикання між цими режимами в моделі передбачені спеціальні перемикачі, що дають змогу вибирати між двома основними режимами керування. Наприклад, перемикач k_{01} керує лівим кормовим рушієм (*Left stern motor*), а перемикач k_{02} контролює правий кормовий рушій (*Right stern motor*). Отже, можна налаштувати систему до конкретних умов і задач дослідження.

Значення напруги, яке подається на рушії БНК, задається за допомогою блоків постійних значень для кожного рушія. Для лівого кормового рушія цей блок позначається як *Left stern motor*, а для правого кормового рушія – як *Right stern motor*. І на початковому етапі симуляції ці блоки встановлюються на нульові значення, що означає відсутність початкової напруги на рушіях. У рамках першого варіанта стабілізації курсу руху БНК (рис. 3, а) напруга на носових рушіях *Left & Right bow motor* встановлюється на максимальні значення і ці параметри залишаються незмінними протягом усього процесу керування катером. У такому разі забезпечується стабільний рівень тяги, що дає змогу підтримувати задану маршову швидкість без потреби в коригуванні в процесі стабілізації.

У разі симуляції САК БНК в режимі ручного дистанційного керування оператор отримує можливість безпосередньо регулювати напругу, яка подається на рушії. Реалізується це шляхом зміни положення повзунків у спеціальних блоках *motor manual*. Так, для лівого кормового рушія використовується блок *Left stern motor manual*, що має параметр U_1 , тоді як для правого кормового рушія це буде блок *Right stern motor manual* з параметром U_2 . Ці блоки дають можливість оператору змінювати рівень напруги в реальному часі, контролюючи таким чином ефективність роботи рушіїв і курсову стабільність катера.

Математична модель БНК в САК представлена спеціалізованим блоком під назвою *Block_02*. Цей блок є моделювальним комплексом, який здатний враховувати не лише сили упору, що генеруються рушіями, але й їх розташування на катері, напрямки їх дії, геометричні параметри корпусу катера, а також сили тяжіння та плавучості. Крім того, модель враховує гідродинамічний вплив течії, що дає змогу створити точну симуляцію поведінки БНК в умовах реального морського середовища. Головною перевагою цього блока є візуаліза-

ція руху БНК під час виконання комп'ютерного моделювання роботи САК. Хоча моделювання БНК виконується як тривимірний об'єкт у вигляді еліпсоїда обертання, візуалізація надана спрощеною моделлю. У цьому випадку БНК відображається у вигляді ромба, розміщеного на площині. Отже, можна отримати уявлення про загальний рух безекіпажного катера без занурення в складні тривимірні деталі.

Блок з назвою *Block_01* враховує сили, що виникають під час руху БНК. Керуючись поточним положенням апарата, цей блок визначає сили РКК та надсилає сигнал до математичної моделі *Block_02*, який вносить відповідні корективи до положення катера. Сигнали напруги на вході цього блока призначені для перерахунку можливих упорів за допомогою математичної моделі ЕРП.

Для коректного виконання цих операцій використовуються електродвигуни безколекторного типу постійного струму, що забезпечує високий рівень ефективності й надійності системи. Крім того, у цьому блоці враховуються значення лінійної швидкості БНК Vg_b , поточного курсового кута q і його регульованого значення f , що дає змогу динамічно коригувати рух катера в реальному часі залежно від зовнішніх умов і завдань.

Перерахунок поточного значення курсу БНК під час виконання маршового руху реалізується блоком з назвою *Block_03*. Структура цього блока має алгоритми, що дають можливість точно обчислювати зміну курсу катера залежно від поточних параметрів його руху та впливу зовнішніх факторів. Параметр bu в цій системі керування відображає заданий курс маршового руху БНК і залишається сталою величиною під час моделювання. Блок *Block_06* функціонує як сенсор кутового положення, що виконаний у вигляді аперіодичної ланки, після якої визначається помилка e' , яка є результатом порівняння поточного курсового кута q з коригованим значенням q' . Формування помилки e , яка передається на сенсор, відбувається шляхом порівняння цих двох значень. Блок *Block_05* реалізує один із класичних регуляторів ПІ (пропорційно-інтегральний), що входить до САК курсом БНК. Коли сигнал помилки e проходить через ПІ-регулятор, він генерує сигнал керування за відхиленням bp , що дає змогу здійснити корекцію руху катера, забезпечуючи його поворот до заданого курсу. Сигнал f забезпечує повернення до встановленого курсу.

Сигнали, що надходять до регулятора, обробляються з використанням нечіткої логіки, що реалізована в Simulink через блок *Block_04*. Цей блок дає змогу застосовувати нечітке керування

для підтримання курсу БНК, тоді як традиційні методи не дають необхідної точності в умовах неповної або неточної інформації.

Для підведення та відведення сигналів від блока нечіткої логіки *Block_04* використовуються проміжні блоки *Mux* і *Demux*. Блок *Mux* агрегує вхідні сигнали в один потік, що дає можливість ефективно передавати кілька вхідних параметрів до блока нечіткої логіки. Блок *Demux* здійснює зворотнє розподілення сигналів після їх обробки, даючи змогу кожному з вихідних сигналів потрапити до відповідних частин системи керування.

Структуру регулятора з використанням нечіткої логіки для стабілізації курсу БНК відображено на рис. 5, де показано, як нечітке керування інтегрується в загальну систему керування, забезпечуючи адаптивність і здатність системи до роботи в умовах зміни параметрів та невизначеності.

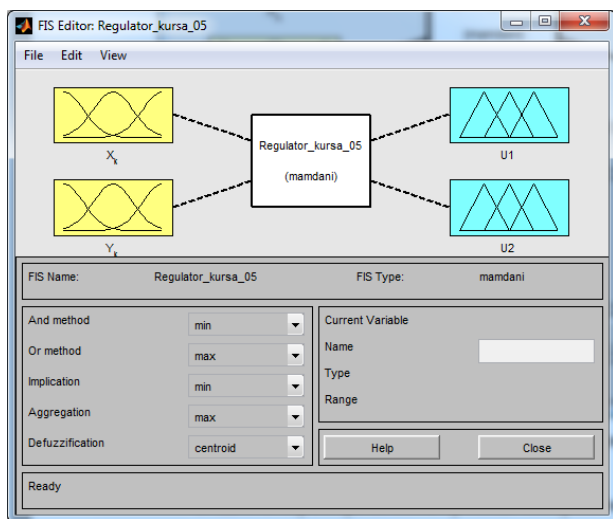


Рис. 5. Структура блока *Block_04* з використанням нечіткої логіки

Вхідними параметрами блока нечіткої логіки є різниця між граничними значеннями координат X та Y і поточними координатами X_k та Y_k , що визначають місцезнаходження БНК на шляху.

Вхідні дані дають можливість регулятору аналізувати відхилення поточного положення катера від бажаного курсу та вжити відповідних коригувальних заходів для підтримки точного руху.

Вихідними параметрами блока є значення постійної напруги U_1 і U_2 , що надходять на ЕРП. Значення керують напрямком і силою упору, необхідними для коригування руху катера та підтримання його курсу.

Робота регулятора з використанням нечіткої логіки реалізується за правилами прийняття рішень, що визначають поведінку системи на основі вхідних даних. Правила представлені у вигляді табл. 1, де для кожної можливої комбінації відхилень координат і напрямків руху зазначені відповідні значення напруги на ЕРП.

Налаштування нечіткого регулятора в узагальненому випадку має враховувати особливості конфігурації РКК БНК як об'єкта керування. Наприклад, у разі додаткових допоміжних підрулюючих пристроїв кількість регульованих ЕРП може бути змінено. Для кожної змінної можна встановити різні типи функцій належності, які визначають, як інтерпретувати значення вхідних параметрів. Функції належності визначають, які значення вхідних змінних потрапляють у певні категорії або області допустимих значень. Наприклад, для вхідних значень можна використовувати функції належності типу трикутника, трапеції чи гаусової кривої, які чітко визначають, у якій мірі значення входить у кожен із цих наборів. Кількість задіяних термів та їх межі налаштовуються в процесі перевірки відпрацювання системи та залежать від функціональних можливостей задіяних ЕРП відпрацьовувати заданий курс. У такому разі для вибору кількості й розташування ЕРП варто враховувати масогабаритні показники БНК, який має забезпечувати автоматичний рух. На цей випадок у статті представлені таблиці налаштувань нечіткого регулятора САК БНК з урахуванням ЕРП на базі електродвигунів постійного струму безколекторного типу.

Таблиця 1

Правила прийняття рішень нечіткого регулятора (варіант 1)

№	Найменування параметра	Позначення									
		$U1$	$U2$	$U1$	$U2$	$U1$	$U2$	$U1$	$U2$	$U1$	$U2$
1	Сигнал										
2	Z	VH	VVL	VH	VVL	VH	VL	VH	VL	VH	VM
3	L	VH	VVL	VH	VL	VH	VL	VH	VM	VH	VH
4	M	VH	VL	VH	VL	VH	VM	VH	VH	VH	VH
5	B	VH	VL	VH	VM	VH	VH	VH	VH	VH	VVH
6	VB	VH	VM	VH	VH	VH	VH	VH	VVH	VH	VVH
7	X_k / Y_k	Z		L		M		B		VB	

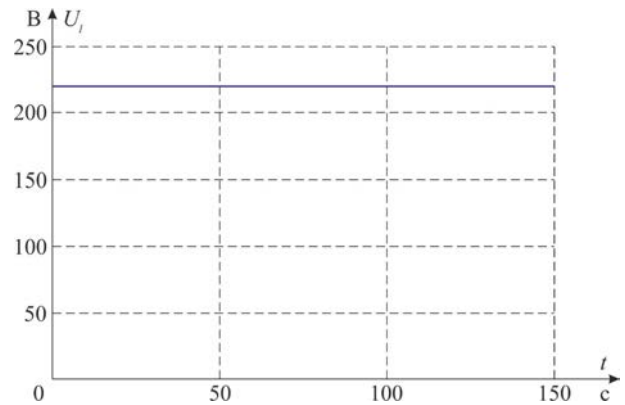
Табл. 2 відображає набори правил, які обчислюють коригувальні значення, забезпечуючи точне підтримання курсу БНК в умовах змінного середовища.

Для введення та збереження даних правил у логіці нечіткого регулятора в середовищі Simulink потрібно перейти до вкладки *Edit* і вибрати пункт *Rules*. У цьому меню користувач може створити або змінити набір правил нечіткої логіки, що визначають, як регулятор повинен реагувати на різні комбінації вхідних параметрів.

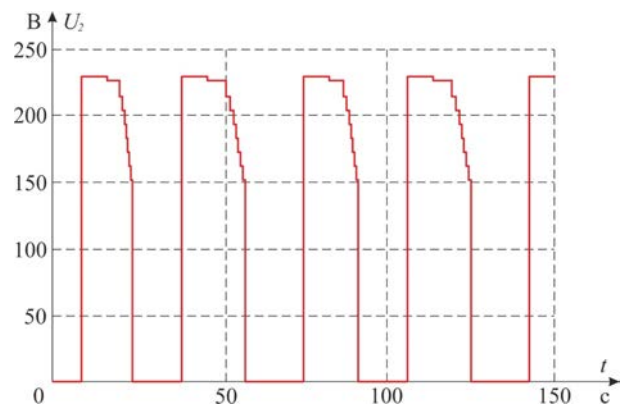
Згідно з правилами прийняття рішень, визначеними в системі нечіткої логіки, регулятор здійснюватиме керування напругою лише на лівому горизонтальному кормовому ЕРП. Отже, можна забезпечити точний контроль за курсом БНК, зокрема за малих відхилень від заданого курсу. Система нечіткої логіки підлаштовується до змін у положенні катера, регулюючи вхідні значення таким чином, щоб мінімізувати відхилення від курсу.

Із застосуванням запропонованої Simulink моделі САК курсу БНК проводиться симуляція, у рамках якої нечіткий регулятор коригує величину вихідних сигналів керування на основі вхідних змінних. Моделювання в Simulink дає змогу ефективність системи й досягти бажаного рівня стабільності курсу за різних зовнішніх умов.

Таким чином, отримуємо перехідний процес, що демонструє роботу запропонованого нечіткого регулятора на певному проміжку часу (рис. 6). Перехідний процес демонструє ефективність підлаштування системи до змін умов руху та здатність регулятора коригувати курс БНК у реальному часі. У момент початку руху та зміни зовнішніх факторів, як-от течії або зміни в напрямку, нечіткий регулятор забезпечує плавний перехід до бажаного курсу без значних коливань або різких змін, що позитивно впливає на стабільність руху й ефективність виконання задач, пов'язаних із переміщенням безпечного катера.



а)



б)

Рис. 6. Перехідний процес роботи нечіткого регулятора САК курсу БНК (варіант 1):
а) – напруга на лівому кормовому ЕРП;
б) – напруга на правому кормовому ЕРП

Візуалізація перехідного процесу (рис. 7) дає можливість детально спостерігати за тим, як зміни на вході регулятора (наприклад, відхилення курсу) коригуються через варіації вихідних сигналів напруги, які подаються на ЕРП. Подібний процес необхідний для подальшої оптимізації роботи САК та забезпечення надійного керування в умовах реальної роботи катера.

Таблиця 2

Позначення прийнятих змінних

№	Найменування параметра	Позначення	Позначення	Значення
1	Відхилення майже відсутнє	Z	VVL	Напруга дуже мала
2	Мале відхилення	L	VL	Напруга мала
3	Середнє відхилення	M	VM	Напруга середня
4	Велике відхилення	B	VH	Напруга висока
5	Дуже велике відхилення	VB	VVH	Напруга дуже висока

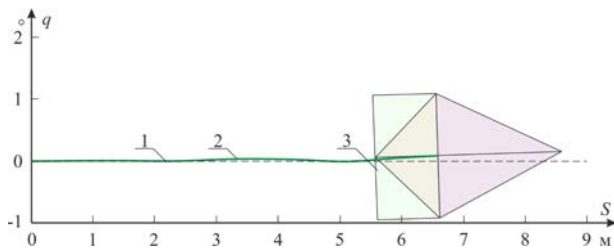


Рис. 7. Візуалізація відпрацювання заданого курсу БНК під час роботи САК (варіант 1):
1) – заданий курс q ; 2) – фактичний курс f ;
3) – модель БНК

Другий варіант підтримання курсу за маршового руху БНК передбачає регулювання двох кормових ЕРП, що дає змогу точніше контролювати напрямок руху в умовах змінних факторів, як-от течії або хвилювання. Для цього потрібно змінити функції належності вихідного параметра U_i (табл. 3) нечіткого регулятора, щоб він міг враховувати необхідність зміни напруги не лише на одному ЕРП, але й на двох одночасно. Функції належності вихідних сигналів регулятора визначатимуть не лише величину напруги для одного кормового ЕРП, а й взаємозв'язок між напругами для двох ЕРП, що дасть можливість точно стабілізувати курс катера за зміни умов руху.

Зміни функцій належності вихідного параметра U_i допоможуть забезпечити відповідну корекцію напрямку в режимах із високою швидкістю та за наявності сильних течій.

Більш детально запропоновані функції належності вихідної змінної U_i нечіткого регулятора для другого варіанта підтримання курсу руху БНК наведено на рис. 8.

У цьому варіанті підтримання бажаного курсу функції належності вихідних сигналів U_i мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити керування напругою на двох кормових ЕРП одночасно. Функції визначають залежність між різницею поточного і заданого курсу та напругою, що подається на кожен з ЕРП. Налаштування функ-

цій належності на цьому етапі має забезпечити не тільки точність стабілізації курсу, але й враховувати динамічні зміни в умовах навколишнього середовища, як-от зміни швидкості руху, вплив течій або зміна навантаження на катер. Тому функції належності для другого варіанта підтримання курсу матимуть кращий характер, що дасть змогу точно регулювати напругу на обох кормових ЕРП, а не лише на одному. Отриманий перехідний процес для другого варіанта підтримання курсу БНК представлено на рис. 8.

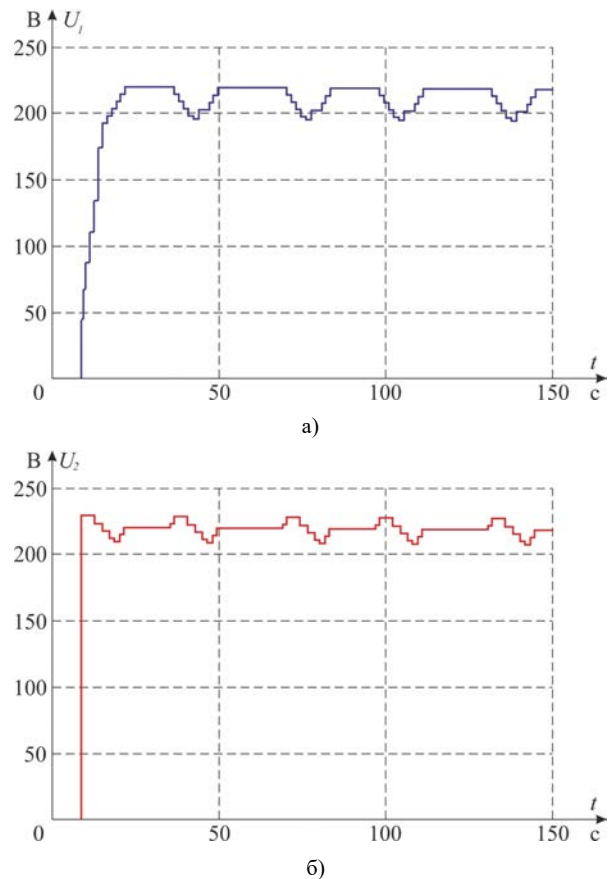


Рис. 8. Перехідний процес роботи нечіткого регулятора САК курсу БНК(варіант 2):
а) – напруга на лівому кормовому ЕРП;
б) – напруга на правому кормовому ЕРП

Таблиця 3

Правила прийняття рішень нечіткого регулятора (варіант 2)

№	Найменування параметра	Позначення									
		U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
1	Сигнал	VH	VVL	VH	VVL	VH	VL	VM	VL	VL	VM
2	Z	VH	VVL	VH	VL	VM	VL	VM	VM	VL	VH
3	L	VM	VL	VM	VL	VM	VM	VL	VH	VL	VH
4	M	VM	VL	VM	VM	VL	VH	VL	VH	VVL	VVH
5	B	VM	VL	VM	VM	VL	VH	VL	VH	VVL	VVH
6	VB	VVL	VM	VL	VH	VL	VH	VVL	VVH	VVL	VVH
7	X_k / Y_k	Z		L		M		B		VB	

Такий варіант регулювання дає змогу досягнути більш високого рівня стабільності та точності керування в складних умовах, де перший варіант стабілізації може бути недостатньо ефективним.

За результатами моделювання другого варіанта підтримання заданого курсу, де регулюються два кормові ЕРП, отримано перехідний процес, що демонструє ефективність двостороннього керування напругою на ЕРП. Візуалізований процес регулювання показує (рис. 9), як САК забезпечує точне підтримання заданого курсу, компенсуючи зовнішні впливи та варіації в русі катера.

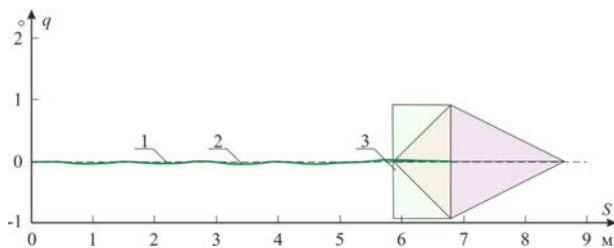


Рис. 9. Візуалізація відпрацювання заданого курсу БНК під час роботи САК (варіант 2):
1) – заданий курс q ; 2) – фактичний курс f ;
3) – модель БНК

Моделювання показує, що перехідний процес є більш плавним і стабільним порівняно з першим варіантом, де регулювався лише один кормовий ЕРП. Завдяки більш гнучкому регулюванню система вчасно реагує на зміни й забезпечує маневреність навіть у складних умовах. Таким чином, отримав подальший розвиток принцип автоматичного керування БНК з впровадженням САК курсом морського рухомого об'єкта, що забезпечує стабільність руху під час різних режимів експлуатації.

Варто відзначити, що перехідний процес, отриманий у другому варіанті реалізації підтримання бажаного курсу безекіпажного надводного катера, проходить швидше, ніж у першому варіанті. Цю ситуацію можна пояснити тим, що в цьому випадку обидва електрорушійні пристрої зазнають регулювання. Також слід зауважити, що напруги керування кормового лівого та правого електрорушійних пристроїв так само відрізняються на 10 В. У процесі підтримання бажаного курсу катера сили упорів, створених електрорушійними пристроями, не змінюють свого напрямку з метою підвищення швидкості маршового руху морського рухомого об'єкта. Таке алгоритмічне забезпечення було спеціально

розроблено в рамках бази правил для запропонованого нечіткого регулятора.

ВИСНОВКИ. Ефективність відпрацювання розробленої системи автоматичного керування курсом безекіпажного надводного катера залежить від конфігурації досліджуваного рушійно-кормового комплексу та продуктивності застосованих електрорушійних пристроїв. Методом комп'ютерного моделювання досліджено роботу запропонованої системи з використанням двох варіантів налаштувань нечіткого регулятора, яка здатна виконувати підтримку максимальної швидкості маршового руху об'єкта та забезпечувати плавність регулювання швидкостей обертання гребних електрорушійних пристроїв. Працездатність розробленої системи підтверджують перехідні процеси керування, тривалість яких у першому варіанті налаштувань нечіткого регулятора не перевищує 16 с від початку прямолінійного руху, а в другому варіанті – 14 с, що є цілком достатнім для дослідженої системи автоматичного керування курсом безекіпажного надводного катера з урахуванням продуктивності задіяного рушійно-кормового комплексу й відповідної швидкості руху 0,51 м/с.

Автор вважає за доцільне спрямувати подальші дослідження на вирішення проєктних задач, пов'язаних з удосконаленням системи автоматичного керування безекіпажним надводним катером, яка вирішуватиме питання просторового руху катера з урахуванням зміни й підтримання бажаних параметрів крену та диферента катера для підвищення загальної ефективності автоматичного руху морського рухомого об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

- Shiqi L., Xingmin W., Yang W., Qian L., Jiuxiang Y., Eugene L. Path planning method for USVs based on improved DWA and COLREGs. *Intelligence & robotics*, 2024, 4 (4), 385–405.
- Tao Y., Du J., Lewis F.L. Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2024, 25 (11), 17810–17820.
- Zehao He, Ligang Li, Hongbin Xu, Zong Lv, Yongshou Dai. Collaborative obstacle detection for dual USVs using MGNN-DANet with movable virtual nodes and double attention. *Drones*, 2024, 8 (9), 418.
- Hui Z., Zhou S., Qichao X., Dongfeng F. USV fleet-assisted collaborative data backup in marine internet of things. *IEEE Internet of things journal*, 2024, 11 (22), 36308–36321.
- Wei G.A., Zhang J.Q. Research on formation navigation of USV based on improved A* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 2024, 24 (4–5), 3191–3209.

6. Wang C.C., Wang Y.L., Jia L. Multi-USV formation collision avoidance via deep reinforcement learning and COLREGs. *IEEE/CAA Journal of automatica sinica*, 2024, 11 (11), 2349–2351.
7. Chaohong G., Youbing F., Weibo Z., Litao C., Huiyan C. Research on autonomous collision avoidance of USV based on improved APF algorithm. *Journal of physics conference series*, 2024, 2868 (1), 012007.
8. Jing Z., Jia R., Yani C., Delong F., Jingyu C. Multi-USV Task planning method based on improved deep reinforcement learning. *IEEE Internet of things journal*, 2024, 11 (10), 18549–18567.
9. Elenrieder K.D., Camurri M. Relaxed control barrier function based control for closest approach by underactuated USVs. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2024, 49 (4), 1301–1321.
10. Rao J., Xu X., Bian H., Chen J., Wang Y., Lei J., Giernacki W., Liu M. A modified random network distillation algorithm and its application in USVs naval battle simulation. *Ocean engineering*, 2024, 261, 112147.
11. Wen Y., Tao W., Zhu M., Zhou J., Xiao C. Characteristic model-based path following controller design for the unmanned surface vessel. *Applied ocean research*, 2020, 101, 102293.
12. Gongxing, Wu, Taotao Xu, Yushan Sun, Jiawei Zhang. Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*, 2022, 19 (2), 1–20.
13. Wang Y., Liu W., Liu J., Sun C. Cooperative USV–UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control. *ISA Transactions*, 2023, 137, 222–235.
14. Alvaro-Mendoza E., Gonzalez-Garcia A., Castañeda H., León-Morales J.D. Novel adaptive law for super-twisting controller: USV tracking control under disturbances. *ISA Transactions*, 2023, 139, 561–573.
15. Zheng Y.B., Fan W.X., Han M.Y. Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*, 2021, 40 (03), 1–15.
16. Li C., Zhao X., Yu R., Chen Y.H., Lin F. A novel robust control and optimal design for fuzzy unmanned surface vehicles (USVs). *International journal of fuzzy systems*, 2024, 1–15.
17. Sun C., Liu J., Yu J. Improved adaptive fuzzy control for unmanned surface vehicles with uncertain dynamics using high-power functions. *Ocean engineering*, 2024, 312, 119168.
18. Xiaoyong S., Guoqing Z., Hongguang L., Guifu T. Research on intelligent navigation technology: intelligent guidance and path-following control of USVs. *Journal of marine science and engineering*, 2024, 12 (9), 1548.
19. Zhou G., Zhang H., Xu C., Zhou X., Liu Z., Zhao D., Lin J., Wu G. A real-time data acquisition system for single-band bathymetric LiDAR. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2023, 61, 1–21.
20. Lifei S., Xiaoqian S., Hao S., Kaikai X., Liang H. Collision avoidance algorithm for USV based on rolling obstacle classification and fuzzy rules. *Journal of marine science and engineering*, 2021, 9 (12), 1321.
21. Liu J., Achurra A., Zhang C., Bury A., Wang X. A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*, 2024, 23 (1), 1–13.
22. Liu W., Chen S., Hu Y., Lou N., Wang S. Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*, 2024, 35 (7), 076307.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF COURSE FOR AN UNMANNED SURFACE VESSEL

Andrii Voitasyk

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering of Ship and Robotic Complexes

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, andrii.voitasyk@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9409-6108

Ihor Sabutskyi

Postgraduate Student

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, sabutskyi1994@gmail.com

ORCID: 0009-0001-6045-3250

An unmanned surface vessel is an innovative solution for the maritime industry, where the absence of a crew significantly reduces operating costs and increases the safety of missions. A marine moving object can be equipped with various technologies for automatic control, which allows to ensure the accuracy and correctness of movement even in difficult weather conditions. The solution of one of such tasks is performed by the automatic course control system, which

is responsible for adjusting the direction of movement in accordance with the influence of external factors. The purpose of the article is to develop an automatic course control system for an unmanned surface vessel using a fuzzy controller. An automatic course control system for an unmanned surface vessel with course stabilization was implemented using the method of mathematical modeling. The behavior of a marine moving object is modeled in the form of an ellipsoid of rotation in a three-dimensional plane. The article describes several options for using electric propulsion devices of an unmanned surface vessel in different modes of its operation. An automatic course control system has been developed that uses fuzzy logic to adjust signals supplied to electric propulsion devices. The adopted technical solutions allow reducing errors in the course of the vessel during its movement, both in conditions of constant and dynamically variable horizontal movement. The principle of automatic control of an unmanned surface vessel has been further developed with the introduction of an automatic course control system for a marine moving object, which ensures stability of movement during various operating modes. In particular, the configuration of the propulsion and steering complex of an unmanned surface vessel is presented, which allows for effective maneuvering on the sea surface. The modeling results have shown significant efficiency of the automatic course control system, which can operate in two modes of maintaining the desired course: ensuring support of the maximum cruising speed and regulation within the limits of permissible cruising speeds.

Key words: unmanned surface vessel, automatic control system, electric propulsion device, regulator.

REFERENCES

- Shiqi, L., Xingmin, W., Yang, W., Qian, L., Jiuxiang, Y., Eugene, L. (2021). Path planning method for USVs based on improved DWA and COLREGs. *Intelligence & robotics*, 4 (4), 385–405.
- Tao, Y., Du, J., Lewis, F.L. (2024). Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 25 (11), 17810–17820.
- Zehao, H., Ligang, L., Hongbin, X., Zong, Lv, Yongshou, D. (2024). Collaborative obstacle detection for dual USVs using MGNN-DANet with movable virtual nodes and double attention. *Drones*, 8 (9), 418.
- Hui, Z., Zhou, S., Qichao, X., Dongfeng, F. (2024). USV fleet-assisted collaborative data backup in marine internet of things. *IEEE Internet of things journal*, 11 (22), 36308–36321.
- Wei, G.A., Zhang, J.Q. (2024). Research on formation navigation of USV based on improved A* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 24 (4–5), 3191–3209.
- Wang, C.C., Wang, Y.L., Jia, L. (2024). Multi-USV formation collision avoidance via deep reinforcement learning and COLREGs. *IEEE/CAA Journal of automatica sinica*, 11 (11), 2349–2351.
- Chaohong, G., Youbing, F., Weibo, Z., Litao, C., Huiyan, C. (2024). Research on autonomous collision avoidance of USV based on improved APF algorithm. *Journal of physics conference series*, 2868 (1), 012007.
- Jing, Z., Jia, R., Yani, C., Delong, F., Jingyu, C. (2024). Multi-USV Task planning method based on improved deep reinforcement learning. *IEEE Internet of things journal*, 11 (10), 18549–18567.
- Elenrieder, K.D., Camurri, M. (2024). Relaxed control barrier function based control for closest approach by underactuated USVs. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 49 (4), 1301–1321.
- Rao, J., Xu, X., Bian, H., Chen, J., Wang, Y., Lei, J., Giernacki, W., Liu, M. (2024). A modified random network distillation algorithm and its application in USVs naval battle simulation. *Ocean engineering*, 261, 112147.
- Wen, Y., Tao, W., Zhu, M., Zhou, J., Xiao, C. (2020). Characteristic model-based path following controller design for the unmanned surface vessel. *Applied ocean research*, 101, 102293.
- Gongxing, Wu, Taotao Xu, Yushan Sun, Jiawei Zhang. (2022). Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*, 19 (2), 1–20.
- Wang, Y., Liu, W., Liu, J., Sun, C. (2023). Cooperative USV-UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control. *ISA Transactions*, 137, 222–235.
- Alvaro-Mendoza, E., Gonzalez-Garcia, A., Castañeda, H. León-Morales, J.D. (2023). Novel adaptive law for super-twisting controller: USV tracking control under disturbances. *ISA Transactions*, 139, 561–573.
- Zheng, Y.B., Fan, W.X., Han, M.Y. (2021). Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*, 40 (03), 1–15.
- Li, C., Zhao, X., Yu, R., Chen, Y.H., Lin, F. (2024). A novel robust control and optimal design for fuzzy unmanned surface vehicles (USVs). *International journal of fuzzy systems*, 1–15.
- Sun, C., Liu, J., Yu, J. (2024). Improved adaptive fuzzy control for unmanned surface vehicles with uncertain dynamics using high-power functions. *Ocean engineering*, 312, 119168.
- Xiaoyong, S., Guoqing, Z., Hongguang, L., Guifu, T. (2024). Research on intelligent navigation technology: intelligent guidance and path-following control of USVs. *Journal of marine science and engineering*, 12 (9), 1548.
- Zhou, G., Zhang, H., Xu, C., Zhou, X., Liu, Z., Zhao, D., Lin, J., Wu, G. (2023). A real-time data acquisition system for single-band bathymetric LiDAR. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 61, 1–21.
- Lifei, S., Xiaoqian, S., Hao, S., Kaikai, X., Liang, H. (2021). Collision avoidance algorithm for USV based on rolling obstacle classification and fuzzy rules. *Journal of marine science and engineering*, 9 (12), 1321.
- Liu, J., Achurra, A., Zhang, C., Bury, A., Wang, X. (2024). A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*, 23 (1), 1–13.
- Liu, W., Chen, S., Hu, Y., Lou, N., Wang, S. (2024). Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*, 35 (7), 076307.

Стаття надійшла 25.11.2024