

УДК 656.61.052(045)

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ ПО ЗАДАНІЙ ТРАЄКТОРІЇ

**Піпченко О. Д.**, д.т.н., доцент Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: nav.researches@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6878-0619;

**Конон Н. М.**, аспірант, старший викладач Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: scientia.nk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4651-7622.

*У даній роботі досліджуються проблеми та рішення автоматизації навігації суден, зосереджуючись на вдосконаленні автоматичних пристроїв і систем для контролю руху суден по заданій траєкторії. У статті наведено огляд сучасних математичних моделей, алгоритмів функціонування та методів їх реалізації, з точки зору їх впливу на ефективність систем контролю за траєкторією. Підкреслено потенційні обмеження певних методів впровадження та відповідну необхідність перегляду законів управління або пошуку нових підходів для параметричної та структурної ідентифікації процесу управління. Метою дослідження є удосконалення методів управління судном на заданій траєкторії. Представлені математичні залежності руху по прямолінійній та криволінійній траєкторіях. Встановлено залежності та зв'язки між заданим шляхом судна й динамічними параметрами, що використовуються для контролю слідування траєкторії судном. Ефективність представленого алгоритму управління судном по заданій траєкторії підтверджена імітаційним моделюванням руху на прикладі контейнеровозу типу S-175. У даній роботі, зокрема, наведені результати імітаційного моделювання як для прямолінійної складової заданого маршруту судна, так і для криволінійного відрізка маршруту, з урахування точки початку повороту та динамічної кутової швидкості судна для утримання судна на запланованій криволінійній траєкторії.*

**Ключові слова:** безпека навігації; контроль утримання на траєкторії; автоматизовані судові системи; управління судном; маневрування судна; динамічні параметри руху судна.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.029-043**

**Вступ.** Сучасні морські транспортні системи відіграють ключову роль у міжнародній торгівлі завдяки своїй економічній ефективності. Постійна необхідність удосконалення системи управління безпекою судноплавства в морській галузі підкреслюється необхідністю захисту людського життя, зменшення ймовірності надзвичайних ситуацій на морі та навігаційних небезпек, забезпечення захисту навколишнього середовища та уникнення несприятливих економічних наслідків, пов'язаних зі збитками від морських аварій та інцидентів.

Серйозні наслідки навігаційних аварій посилюються роллю людської помилки або «людського фактору» в роботі морських суден. Разом із удосконаленням технічного оснащення суден відбулося скорочення екіпажів, оскільки більша частина робочих процесів стала автоматизованою завдяки впровадженню інформаційних технологій, у тому числі навігаційних систем керування судном. Інформаційне перевантаження робітників на борту судна та психологічний стан людини в екстремальних ситуаціях мають бути враховані при розробці сучасних автоматизованих систем морської галузі з метою мінімізації прийняття хибних управлінських рішень.

Таким чином, у сучасному світі, рівень безпеки на судні, а саме навігаційна її складова, у більшій мірі залежить від ефективності прийняття рішень судовим і береговим персоналом у будь-яких навігаційних умовах. З метою підвищення контролю за прийнятими рішеннями, тематика автоматизованих систем навігації є затребуваною і актуальною.

**Постановка проблеми.** Відомо, що морський транспорт отримує широке застосування в різних сегментах міжнародних перевезень, зокрема в їх цивільному та комерційному напрямках, що зумовлюється, серед іншого, його економічною ефективністю для міжнародної торгівлі. У цьому аспекті, залишаються актуальними питання забезпечення безпеки морських перевезень та судноплавства. З точки зору забезпечення безпечної навігації та маневрування морських суден необхідними є вирішення задач керування їх

рухом, а саме удосконалення існуючих та розробка нових методів, засобів й систем у цьому контексті. Таким чином, обґрунтовується необхідність впровадження ефективних систем управління морським транспортом, зокрема для морських вантажних транспортних засобів.

У галузі автоматизації судноводіння продовжують залишатися актуальними задачі, пов'язані з удосконаленням автоматичних пристроїв та систем утримання судна на заданому курсі та заданій траєкторії руху. Якість роботи систем автоматичного управління оцінюється за такими показниками, як надійність, точність та швидкодія.

Досягнення необхідного рівня якості управління курсом та проходженням по траєкторії визначається не тільки принципами та законами, які лежать в основі синтезу математичних моделей та алгоритмів функціонування, але й способами реалізації отриманих алгоритмів. Однак деякі способи реалізації можуть накладати обмеження, які є неприйнятними згідно з вимогами до якості рівня управління судном. Таким чином, можна підкреслити потребу в перегляді існуючих законів управління, а також у розробці інноваційних підходів для забезпечення раціональної структури системи автоматичного руху по траєкторії (САРТ) [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існують два потенційних рішення для контролю руху суден по заданій траєкторії: перше передбачає розробку контролера, який стабілізує помилки відстеження траєкторії, визначені неявними виразами, тоді як друге є більш поширеним підходом, в якому попередньо визначений заданий шлях є функцією параметризованої кривої. Системи керування морськими суднами на основі лінійних динамічних моделей є більш простими у реалізації. Ряд робіт присвячені відстеженню та керуванню траєкторією морських суден за допомогою лінійних або нелінійних методів, таких як класичне пропорційно-інтегрально-похідне керування, прогнозне моделювання керування з обмеженнями крену та методам керування на основі спостерігача. Також слід відзначити, що нелінійність й невизначеність моделей суден у поєднанні з впливом зовнішніх факторів часто заважають судну точно підтримувати свій курс уздовж заздалегідь визначеної траєкторії. У цьому контексті, для підвищення надійності замкнутої системи зазвичай використовуються робастні та адаптивні методи керування [3].

Ковзний режим керування (SMC – sliding mode control) широко використовується в морських системах керування. Автори роботи [4] розробили інверсний закон SMC розглядаючи систему робастного відстеження траєкторії. Також у дослідженні [5] представлено нечіткий контролер рульового керування SMC, що враховує насичення вхідного сигналу системи авторульового.

Крім того, методології адаптивного та термінального SMC, а також методології SMC вищого порядку використовувалися для контролю орієнтації та контролю відстеження траєкторії автономних підводних апаратів. Ці схеми, як правило, інтегровані з алгоритмом зворотного кроку для контролю слідування по траєкторії суднами. У роботах [6, 7] був розроблений модифікований ПІ-регулятор із SMC режимом зворотного кроку для підтримки надійності системи керування траєкторією з невідомими параметрами. Однак усі ці методи обмежені необхідністю попереднього знання нелінійної гідродинаміки, тобто нелінійні компоненти моделі є відомими гладкими векторами функції швидкості, а параметри є невідомими сталими векторами з відомими розмірами.

На даний момент запропоновано кілька методів одночасного вирішення обмежень вхідних та вихідних сигналів. У роботі [8] досліджено проблему управління відстеженням траєкторії за умов асиметричних вхідних і вихідних обмежень, а також в умовах невизначеності. Для забезпечення обмежень на вихідні дані системи, були використані асиметричні логарифмічні бар'єрні функції та плавні диференційовані моделі функції помилки Гаусса при розробці контролера та для компенсації ефекту асиметричного насичення виконавчого механізму відповідно. Незважаючи на те, що ці методи стійкі до зовнішніх збурень і невизначеності моделі, вони не можуть бути застосовані безпосередньо для відстеження траєкторії надводних суден. Згодом у роботах [9–11] була розглянута подвійна проблема слідування траєкторії з обмеженнями вхідних та вихідних сигналів для суден, що підлягають

невизначеності моделі та зовнішнім збуренням. Запропонована схема системи керування базується на модифікації алгоритму наведення по лінії видимості (LOS – Line of Sight) [12, 17, 18] та інтегрує бар'єрну функцію Ляпунова, щоб утримувати помилки відстеження надводного судна в попередньо визначених межах продуктивності. Варто відзначити, що схема слідування по шляху, запропонована в [10, 11], незважаючи на надійність щодо невизначеностей і збурень, містить особливість у законі оновлення параметра шляху. Цей параметр є критичним для реалізації системи слідування. З метою покращення даної системи було проведено дослідження [13], у якому представлено робастну стратегію адаптивного керування, щоб змусити морське судно з параметричними невизначеностями та обмеженнями вхідних та вихідних сигналів слідувати заданою траєкторією. Таким чином, підхід не тільки використовує бар'єрну функцію Ляпунова для вирішення проблеми вихідної системи, але й залучує допоміжну систему проєктування для вирішення віртуальних і реальних вхідних насичень.

**Мета та задачі дослідження.** Метою даного дослідження є удосконалення методів управління судном на заданій траєкторії. Задачі дослідження включають:

- 1) Встановлення вихідних умов та параметрів;
- 2) Визначення взаємозв'язків між заданим шляхом судна й динамічними параметрами, що використовуються для контролю слідування траєкторії судном;
- 3) Формування адаптованого алгоритму управління судном заданій траєкторії;
- 4) Проведення імітаційного моделювання з метою перевірки роботи алгоритму.

**Виклад основного матеріалу.** Для контролю маневрування судна по заданій траєкторії необхідною умовою є управління як курсом [1, 2], так і позицією. Метою управління позицією судна є мінімізація бічного відхилення XTD (cross-track distance), що визначається перпендикуляром опущеним з фіксованої точки на судні на лінію заданого маршруту (рис. 1).

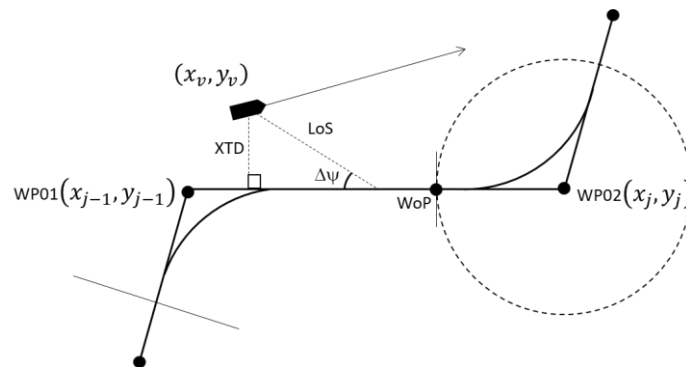


Рисунок 1 – Основні параметри маневрування судна по заданій траєкторії

У даній роботі розрахунки дистанцій та напрямків виконуються на площині, базуючись на думці, що точне маневрування судна є доцільним на відносно невеликих дистанціях. У разі навігації на великих дистанціях, чи необхідності досягнення більшої точності при розрахунках, доцільним є використання існуючих методів сферичної тригонометрії та рівнянь геодезичної прямої, представлених, наприклад, у роботах [14, 15]. В якості опорної точки для розрахунків, як правило, приймається CCRP (Consistent Common Reference Point) – стаціонарна загальна точка відліку.

Бічне відхилення може бути розраховане наступним чином:

$$XTD = \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)} \quad (1)$$

$$\Delta x = (x_j - x_{j-1}); \Delta y = (y_j - y_{j-1}); \quad (2)$$

$$DTP = \sqrt{(x_v - x_{j-1})^2 + (y_v - y_{j-1})^2}; \quad (3)$$

$$DTG = \sqrt{(x_j - x_v)^2 + (y_j - y_v)^2} \quad (4)$$

де  $(x_v, y_v)$  – позиція заданої точки судна;  $(x_j, y_j)$  –  $j$ -та точка заданого шляху;  $DTP$  (Distance to Previous) – дистанція від поточної до попередньої точки маршруту;  $DTG$  (Distance to Go) – дистанція від поточної до наступної точки маршруту.

Для того, щоб запобігти поділу на нуль, треба перетворити вираз (2) наступним чином:

$$XTD = \left. \begin{aligned} & \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 + 1}}, \text{ якщо } \Delta x \neq 0 \\ & XTD = (x_j - x_v), \text{ якщо } \Delta x = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$XTD$  розрахований за формулою (5) буде мати вірний знак для пеленгів судна від поточної в наступну точку маршруту, тобто  $BRG \in (0, 180^\circ)$ .

Визначимо пеленг:

$$\Delta x_{vj} = (x_j - x_v); \Delta y_{vj} = (y_j - y_v) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} & BRG = \arcsin \Delta x_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \geq 0; \\ & BRG = \frac{\pi}{2} + \arcsin |\Delta y_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \geq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ & BRG = \pi + \arcsin |\Delta x_{vj}| / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \leq 0; \\ & BRG = \frac{3\pi}{2} + \arcsin \Delta y_{vj} / DTG, \text{ при } \Delta x_{vj} \leq 0, \Delta y_{vj} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Звідси

$$\left. \begin{aligned} & XTD = \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ коли } BRG \in (0, 179^\circ) \\ & XTD = - \frac{(x_v - x_{j-1}) \frac{\Delta y}{\Delta x} - y_v + y_{j-1}}{\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}, \text{ коли } BRG \in (180, 359^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Математична модель системи взаємозв'язку між судном, стерновою машиною та ПД-регулятору може бути характеризувана наступними залежностями (9) – (13):

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K \delta + K T_3 \dot{\delta}, \quad (9)$$

$$\psi = \int r dt, \quad (10)$$

$$\Delta \psi = \psi_3 - \psi, \quad (11)$$

$$\delta_3 = C_p \Delta\psi + C_d r, \quad (12)$$

$$\delta = \int \min \left\{ \max \left\{ \frac{\delta_3 - \delta}{T_\delta}, -\dot{\delta}_{\text{lim}} \right\}, \dot{\delta}_{\text{lim}} \right\} dt. \quad (13)$$

де  $T_1, T_2, T_3, K$  – відповідні коефіцієнти для моделі судна;  
 $r$  – кутова швидкість судна, рад/с;  
 $\delta, \delta_3$  – поточний і заданий кути перекладки стерна, рад;  
 $\dot{\delta}_{\text{lim}}$  – гранична швидкість перекладки стерна, рад/с;  
 $T_\delta$  – постійна часу стернової машини;  
 $\psi, \psi_3$  – поточний і заданий курси судна, рад;  
 $C_p, C_d$  – пропорційний і диференційний коефіцієнти відповідно.

У роботі [16] запропоновано вводити додатковий елемент у рівняння (12), що має певний ваговий коефіцієнт. В цьому випадку, XTD буде представлено як пропорційна складова до закону управління, що несе додаткову нестабільність у загальну систему управління. Іншим підходом є додавання ще одного елемента, а саме швидкості наближення до заданого маршруту, у перпендикулярному напрямку до нього. Таким чином можна досягти більш стабільної поведінки системи та зменшення автоколиваний. Як результат, закон управління буде представлений у наступному вигляді:

$$\delta_3 = C_p \Delta\psi + C_d r + \int \Delta\psi dt + C_{pXTD} XTD + C_{dXTD} \dot{XTD} \quad (14)$$

З іншого боку, у разі коли різниця між пеленгом з поточної на наступну точку та курсом перевищує значення  $90^\circ$  (іншими словами судно прямує в протилежному напрямі) закон керування не зможе дозволити вивести судно на заданий маршрут.

Згідно до іншого підходу, відображеного у роботі [12], доцільним є використання лінії видимості (LoS – Line of Sight), яку показано на рис. 1. За цих умов закон управління курсом є незмінним, але заданий курс має поправку.

$$\psi_{3XTD} = \psi_3 + \Delta\psi_{XTD} \quad (15)$$

Позиція  $LoS$   $p_{los}(x_{los}, y_{los})$  розташована десь на прямому відрізку маршруту між точками  $wp_j(x_j, y_j)$  та  $wp_{j-1}(x_{j-1}, y_{j-1})$ . Уявимо судно, що знаходиться у центрі кола з радіусом рівним  $n$  його довжин ( $nL$ ), тоді з прямокутного трикутника з гіпотенузою  $LoS$  та катетом  $XTD$  отримаємо:

$$\Delta\psi_{XTD} = -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right) \quad (16)$$

Рівняння (16) має граничне значення при збільшенні дистанції до заданого відрізка траєкторії:

$$\lim_{|XTD| \rightarrow \infty} \Delta\psi_{XTD} = \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

Значення  $LoS$  залежить від розмірів судна, а також його маневрених характеристик. З цієї причини цю величину можна представити у певній кількості довжин судна,  $LoS = n \times L$ . Результати моделювання процесу утримання судна на заданому маршруті показав, що за умов тихої погоди, плавне повернення до траєкторії може досягатися при значенні  $n \in (2,5)$ .

Плавний вихід на задану траєкторію з більших дистанцій може бути забезпечений шляхом обмеження  $\Delta\psi_{XTD}$ , наприклад кутом  $45^\circ$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi_{XTD} &= -\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| \leq \frac{\pi}{4} \\ \Delta\psi_{XTD} &= -\frac{\pi}{4} \text{sign}(XTD), \text{ при } \left|\arctg\left(\frac{XTD}{LoS}\right)\right| > \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

З метою верифікації представленого алгоритму управління судном на заданій прямолінійній траєкторії, був використаний метод імітаційного моделювання. На рис. 2 та рис. 3 відображене виконання маневру повернення судна на траєкторію. Об'єктом управління є модель контейнеровоза типу S-175, що має наступні розміри: довжина – 175 м; ширина – 25,4 м; осадка – 8,5 м.

Кут перекладки стерна при моделюванні обмежений значенням 15°. Робота стерна оптимізована по кількості перекладок (рис. 3), що досягається застосуванням адаптованого закону управління, представленого в роботах [1, 2]. У результаті судно виходить на задану траєкторію досить плавно та без автоколивань.

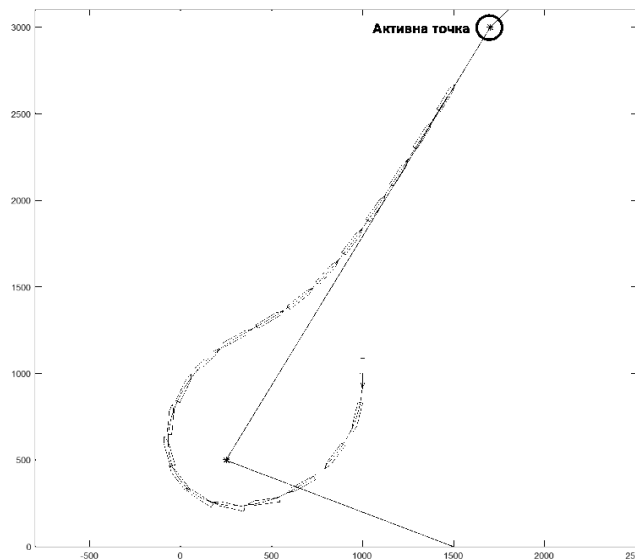


Рисунок 2 – Вихід в активну точку контейнеровозу S-175

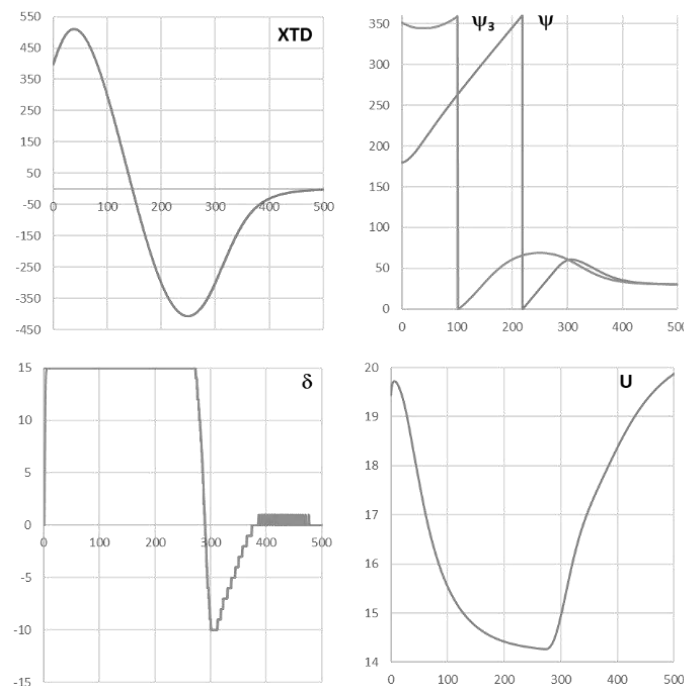


Рисунок 3 – Вихід в активну точку контейнеровозу S-175 – параметри

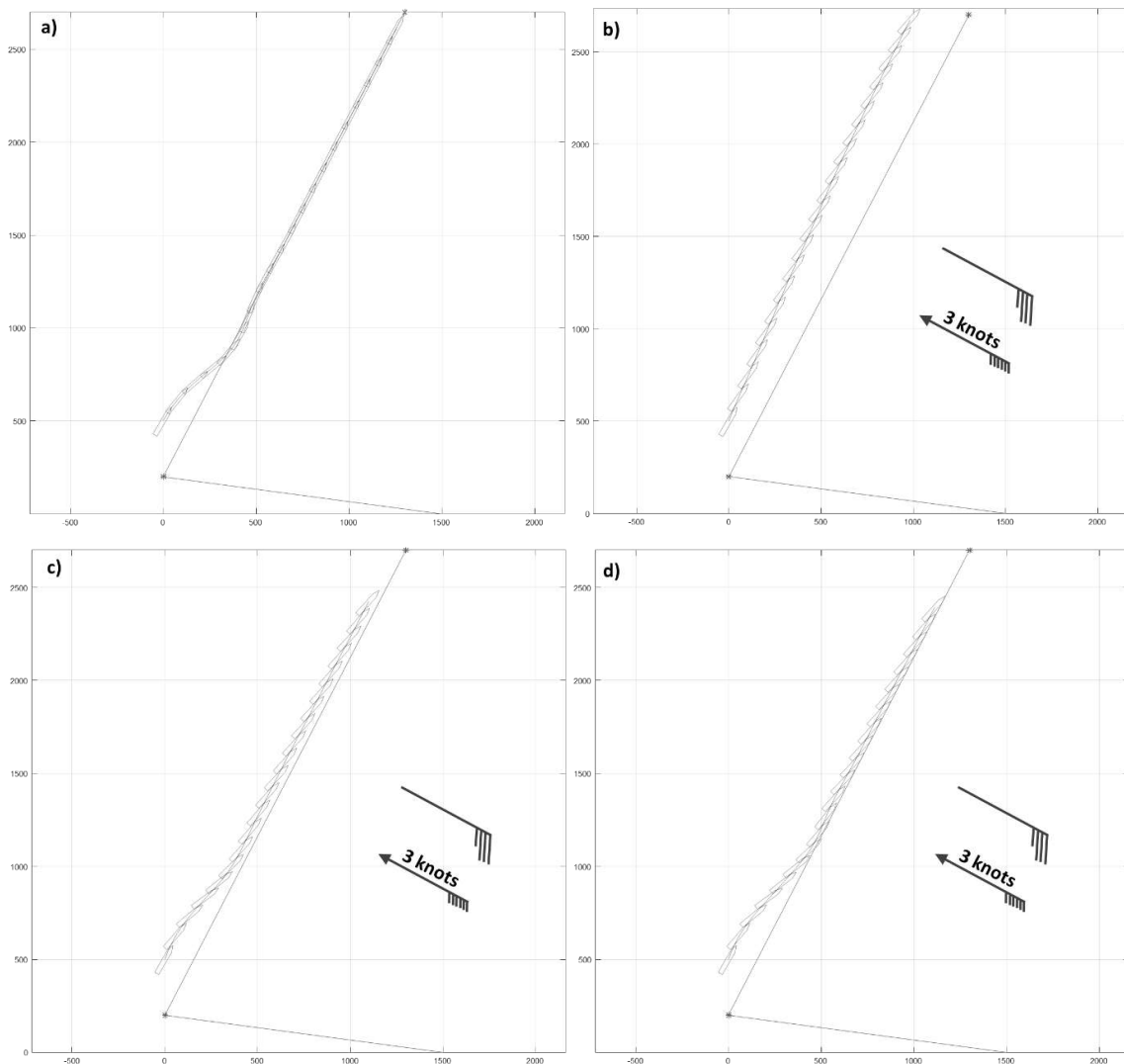


Рисунок 4 – Моделювання утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175 при швидкості 10 вузлів. Умови: а) тиха погода, 0-1 за шкалою Бофорта ( $C_w = 1$ ); б) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ( $C_w = 1$ ); в) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ( $C_w = 2$ ); д) вітер в борт судна, 8 за шкалою Бофорта, течія 2 вузли ( $C_w = 4$ )

Вихід судна на траєкторію, та його подальше утримання за умов тихої з фіксованим значенням  $LoS$  відображена на рис. 4а. Управління з фіксованим значенням  $LoS$  не є ефективним за умов бортових збурень відносно значної сили (рис. 4 (б)), тому запропоновано застосовувати таке значення  $LoS$ , що змінюється динамічно в залежності від величини збурень і дистанції від маршрутного відрізка:

$$\left. \begin{aligned} LoS &= \max \left( \frac{1}{C_{w1}} L, C_{w2} \times |XTD| \right), \Delta\psi \leq \Delta\psi_{lim} \\ LoS &= nL, \Delta\psi > \Delta\psi_{lim} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

де  $\Delta\psi_{lim}$  – різниця між заданим та фактичним курсами, при виході за границі якої значення  $LoS$  починає змінюватись у залежності від  $XTD$ .

Коефіцієнт  $C_{w1}$  задається пропорційно до погодних умов. Коефіцієнт  $C_{w2}$  визначає кут  $\Delta\psi_{XTD}$ , який по суті обчислюється як  $\arctan\left(\frac{1}{C_{w2}}\right)$ . Тобто при  $C_{w2} = 2$ , що відповідає результатам моделювання відображеного на рисунку 4,  $\Delta\psi_{XTD} = 31,3^\circ$ .

На рис. 5–7 показано параметри роботи САРТ під дією бортового вітру (швидкості вітру під час симуляції відображено на рис. 8) та течії швидкістю 2 вузли з різними величинами  $C_{w1}$  (1; 2; 4). На рис. 4 (d) та на рис. 7 видно, що збільшення  $C_{w1}$  до значення 4

призводить до зменшення значення  $XTD$ , але й також до збільшення амплітуди рискання судна навколо заданої лінії маршруту.

У контексті оптимізації слідування траєкторії судном та роботи стернового пристрою, при значенні  $C_{wl} = 2$  досягається оптимальне управління. При відсутніх зовнішніх збуреннях, оптимальний рівень управління досягається при значенні  $C_{wl} = 0,5$ .



Рисунок 5 – Перекладки стерна в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

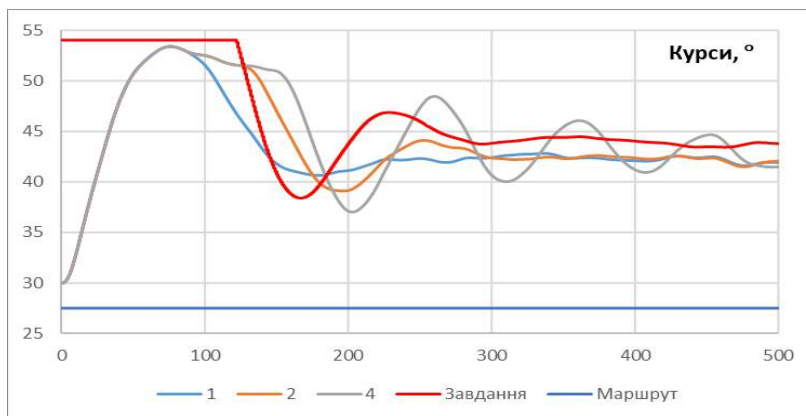


Рисунок 6 – Заданий та фактичний курси судна в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

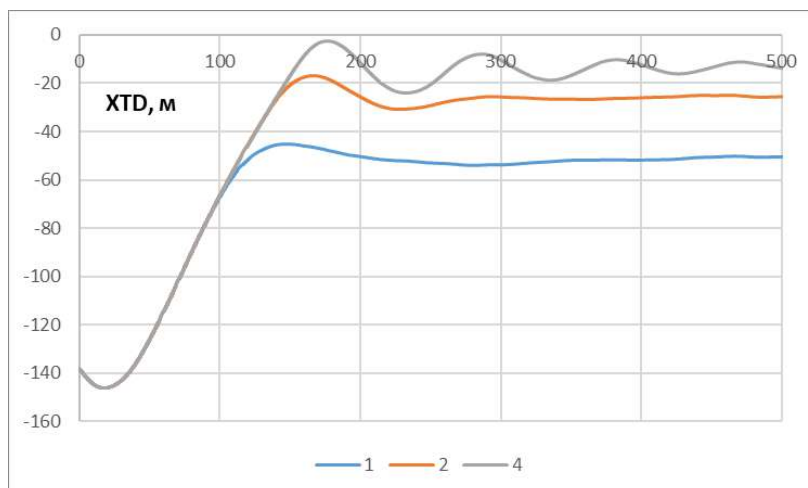


Рисунок 7 – Бокове відхилення від траєкторії в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів



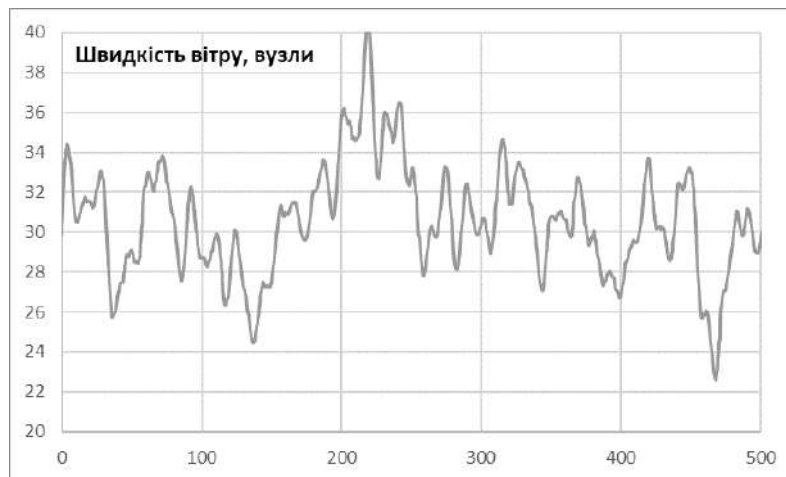


Рисунок 8 – Швидкість вітру в процесі утримання судна на траєкторії для моделі контейнеровозу S-175, що рухається зі швидкістю 10 вузлів

При слідуванні заданим маршрутом при зміні курсу судно рухається по криволінійній траєкторії, яка зазвичай представляє собою дугу з заданим радіусом. Для підтримання заданого радіусу, необхідним є контроль динамічного стану судна у процесі виконання повороту, тому в законі управління потрібно враховувати обмеження кутової швидкості.

Радіус повороту та кутова швидкість пов'язані залежністю:

$$r = \frac{U}{R} \tag{20}$$

де  $R$  – радіус повороту.

У результаті сумарне обмеження кутової швидкості автостернового може бути розраховано наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \Delta r &= \text{sign}(r) \cdot r_{lim} - r, \text{ при } |r| > r_{lim} \text{ та } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) = \text{sign}(r) \\ \Delta r &= 0, \text{ при } |r| < r_{lim} \text{ чи } \text{sign}(\Delta \bar{\psi}) \neq \text{sign}(r) \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

У сучасних умовах, підключення ЕКНІСУ до автостернового для маневрування судна по заданій траєкторії можливо практично напряду. Система дозволяє задавати довільні радіуси повороту, з деякими обмеженнями, які існують у залежності від встановленого програмного забезпечення.

Індикатором переходу судна від режиму утримання на прямолінійному відрізку маршруту до повороту – це така точка, що знаходиться на відстані від точки перетину дуги та прямолінійного відрізка і носить назву wheel-over point (WoP).

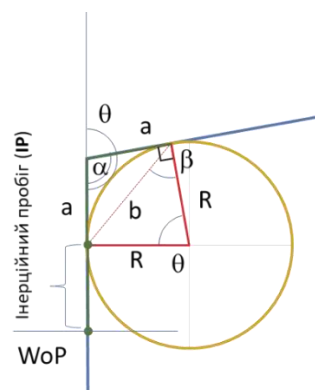


Рисунок 9 – Графічне відображення визначення WoP в залежності від заданого радіуса повороту

Щоб знайти точку початку повороту, тобто точки перетину прямолінійних відрізків заданого маршруту і дуги з заданим значенням радіуса  $R$ , необхідно опустити перпендикуляри з центру кола в точки дотику з прямолінійними відрізками. Утворений у

результаті цього чотирикутник має дві сторони рівні радіусу  $R$  і дві сторони рівні відстані від точки зміни маршрутного відрізка до дотичної з окружністю  $a$ . Цей чотирикутник можна розділити на два рівнобедрених трикутника із спільною основою  $b$ . Таким чином, кут  $\theta$  може бути розрахований як  $\theta = 180 - \alpha$ , де  $\alpha$  – різниця курсів. Спільна основа  $b$  дорівнює:

$$b = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (22)$$

Косинус кута при основі трикутника

$$\cos \beta = \frac{b}{2R} = \sin \frac{\theta}{2} \quad (23)$$

Таким чином, сторона

$$a = \frac{b}{2 \cos(90 - \beta)} \quad (24)$$

Після підстановки (22) і (23) у (24) та ряду перетворень отримаємо:

$$a = \left| \frac{R \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \left( 90 - \arccos \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right) \right)} \right| \quad (25)$$

Тоді дистанція від точки зміни маршрутного відрізка до точки початку повороту визначається як

$$D_{WOP} = a + IP \quad (26)$$

Інерційний пробіг ( $IP$ ) визначає відстань, що проходить судно, набираючи потрібну кутову швидкість. Він залежить від швидкості судна та кута перекладки стерна:  $IP = f(U, \delta)$ . На рисунку 10 представлена величина  $IP$  в різних режимах циркуляції судна. Зазвичай  $IP \approx (1 \pm 0.25) \times L$ , де  $L$  – довжина судна.  $IP$  зростає при збільшенні швидкості або зменшенні кута перекладки стерна.

Судно не завжди може опинитися точно в позиції точки початку повороту. Тому перехід до наступного відрізка траєкторії починається, якщо судно досягло кола з радіусом  $D_{WOP}$  (див. рис. 1). Під час руху по заданому колу алгоритм, описаний рівняннями (15) та (18), не дозволяє точно утримувати судно на заданій траєкторії. Ця проблема може бути вирішена шляхом сегментації криволінійної траєкторії на прямолінійні відрізки, використанням референс-моделі, динамічним обмеженням кутової швидкості, або комбінацією цих методів.

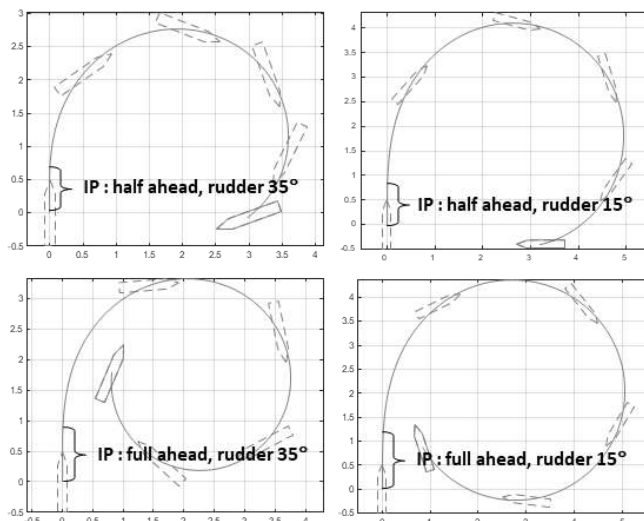


Рисунок 10 – Відображення інерційного пробігу судна на прикладі циркуляції контейнеровозу вантажомісткістю 10000 TEU на правий борт

Враховуючи зменшення поступової складової швидкості судна при виконанні повороту, згідно до виразу (17) також зменшується кутова швидкість, необхідна для утримання судна на радіусі  $R$ .

Таким чином, виникає необхідність в управлінні кутовою швидкістю з метою повернення судна на траєкторію, коли судно зміщується відносно центру дуги повороту.

Відстань від судна до центру дуги повороту може бути розрахована за допомогою рівняння:

$$R_v = \sqrt{(x_{Rj} - x_v)^2 + (y_{Rj} - y_v)^2}. \quad (27)$$

Координати центру дуги визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} x_{Rj} &= x_j - a_j \sin \psi_j + \text{sign}(\alpha) R_j \sin \left( \psi_j + \frac{\pi}{2} \right); \\ y_{Rj} &= y_j - a_j \cos \psi_j + \text{sign}(\alpha) R_j \cos \left( \psi_j + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Звідси задана кутова швидкість визначається як:

$$\begin{aligned} r_3 &= \text{sign}(\alpha_j) U \left( \frac{2}{R_j} - \frac{1}{R_v} \right), \text{ при } DTP \leq D_{WOP} \\ r_3 &= 0, \text{ при } DTP > D_{WOP} \end{aligned} \quad (29)$$

Траєкторія судна за САРТ у тиху погоду відображена на рис. 11. На рис. 12 та 13 відображено кутові швидкості та перекладки стерна відповідно. На рис. 14 відображено аналогічний процес управління при дії зовнішніх збурень спрямованих в одну сторону (вітру та течії).

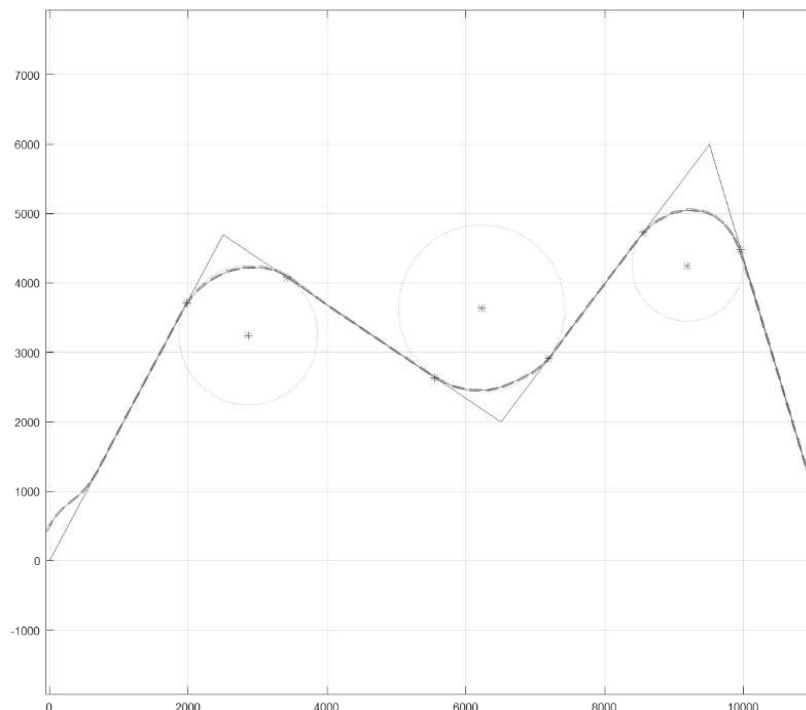


Рисунок 11 – Маневрування судна за заданою траєкторією у тиху погоду для моделі контейнеровозу S-175

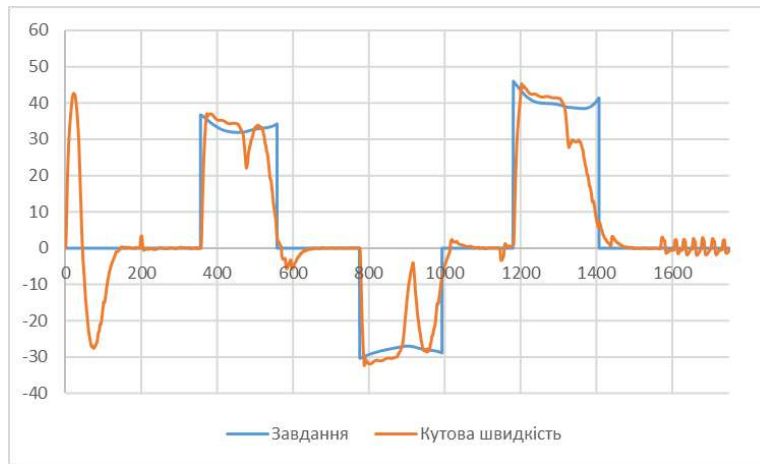


Рисунок 12 – Кутова швидкість, °/хв. Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175



Рисунок 13 – Перекладки стерна, °. Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175

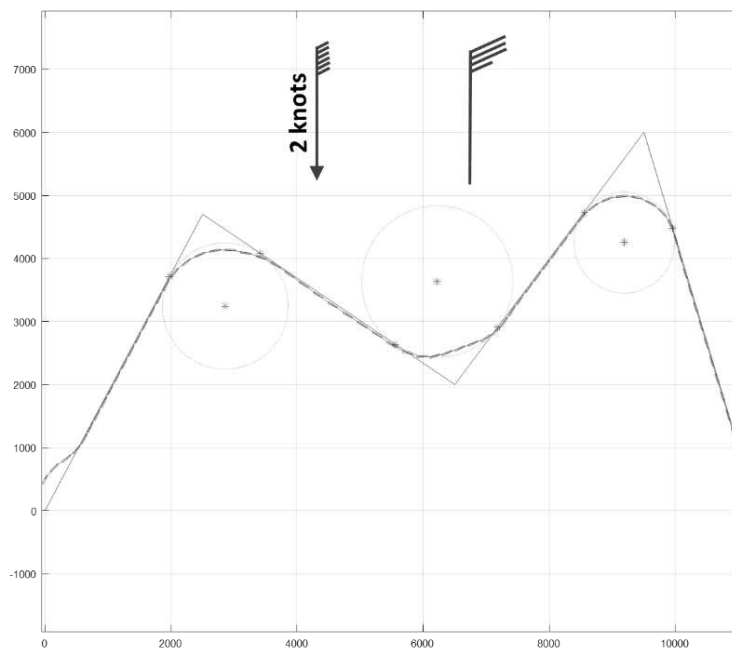


Рисунок 14 – Маневрування судна за заданою траєкторією за умов тихої погоди для моделі контейнеровозу S-175. Швидкість судна – 20 вузлів; вітер N, 8 за шкалою Бофорта (35 вузлів); течія S – 2 вузли

**Висновки.** У даному дослідженні, базуючись на аналізі сучасних методів та алгоритмів, що застосовуються при розробці систем для слідування траєкторії, було проведено математичне моделювання маневрування судна за заданою траєкторією з метою удосконалення існуючих методів та алгоритмів. У ході дослідження були визначені взаємозв'язки між маршрутом судна та необхідними динамічними параметрами для утримання судна на траєкторії. До таких параметрів можна віднести наступні: бокове зміщення судна, поточний і заданий курс, лінія видимості, точка початку повороту, інерційний пробіг, а також кутова швидкість. Для прямолінійного руху отримано оптимізований закон управління з урахуванням швидкості наближення до траєкторії у перпендикулярному до неї напрямку, що дозволяє отримати більш стабільну поведінку системи та зменшити автоколивання. Для підвищення ефективності підходу управління судна за лінією видимості, було запропоновано динамічно змінювати значення лінії видимості в залежності від зовнішніх збурень. Для криволінійного руху було представлено рівняння розрахунку заданої кутової швидкості, необхідної для контролю повороту судна. У результаті моделювання прямолінійного та криволінійного руху були складені відповідні алгоритми управління судном по заданій траєкторії. Верифікація результатів продемонструвала задовільні результати роботи запропонованих алгоритмів.

**Перспективи подальших досліджень.** У контексті перспективи подальших досліджень, а саме розвитку та покращення отриманих результатів слід наголосити на врахуванні впливу глибини під кілем судна на маневреність судна і, відповідно, на ефективність роботи представлених алгоритмів, а також на врахуванні індивідуальних особливостей властивих кожному типу судна.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pipchenko O. and Shevchenko V., “K voprosu avtomatizirovannogo upravleniya sudnom na traektorii,” *Shipping & Navigation*, vol. 19, pp. 149–155, 2010.
2. Pipchenko O. and Shevchenko V., “Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions,” *Marine Intellectual Technologies - Scientific journal*, vol. 4, no. 04, pp. 208–214, 2018.
3. Liu Z., “Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 834–840, Jan. 2019, doi: 10.1049/iet-its.2018.5448.
4. Fu M., Shang W., and Wang T., “Robust Sliding Mode Control-Based Trajectory Tracking Control for an Underactuated Surface Vessel With Prescribed Performance,” *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, Jul. 2019, doi: 10.23919/chicc.2019.8865240.
5. Zhang G. et al., “A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV,” *Ocean Engineering*, vol. 151, pp. 82–92, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.054.
6. Sun Z., Zhang G., Yi B., and Zhang W., “Practical proportional integral sliding mode control for underactuated surface ships in the fields of marine practice,” *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 217–223, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.010.
7. Sun Z., Zhang G., Yang J., and Zhang W., “Research on the sliding mode control for underactuated surface vessels via parameter estimation,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 91, no. 2, pp. 1163–1175, Nov. 2017, doi: 10.1007/s11071-017-3937-8.
8. Zheng Z., Huang Y., Xie L., and Zhu B., “Adaptive Trajectory Tracking Control of a Fully Actuated Surface Vessel With Asymmetrically Constrained Input and Output,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1851–1859, Sep. 2018, doi: 10.1109/tcst.2017.2728518.
9. Zheng Z. and Feroskhan M., “Path Following of a Surface Vessel With Prescribed Performance in the Presence of Input Saturation and External Disturbances,” *IEEE/ASME*

*Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2564–2575, Dec. 2017, doi: 10.1109/tmech.2017.2756110.

10. Zheng Z. and Sun L., “Error-constrained path-following control for a stratospheric airship with actuator saturation and disturbances,” *International Journal of Systems Science*, vol. 48, no. 16, pp. 3504–3521, Oct. 2017, doi: 10.1080/00207721.2017.1381889.

11. Zheng Z., Sun L., and Xie L., “Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel With Actuator Saturation and Faults,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 10, pp. 1794–1805, Oct. 2018, doi: 10.1109/tsmc.2017.2717850.

12. Fossen T. I., “Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control,” Apr. 2011, doi: 10.1002/9781119994138.

13. Ghommam J., Ferik S. E., and Saad M., “Robust adaptive path-following control of underactuated marine vessel with off-track error constraint,” *International Journal of Systems Science*, vol. 49, no. 7, pp. 1540–1558, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207721.2018.1460412.

14. Karney C. F. F., “Algorithms for geodesics,” *Journal of Geodesy*, vol. 87, no. 1, pp. 43–55, Jun. 2012, doi: 10.1007/s00190-012-0578-z.

15. Vincenty, “Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations,” *Survey Review*, vol. 23, no. 176, pp. 88–93, Apr. 1975, doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88.

16. Lukomskij Yu. A., Peshekhonov V. G. and Skorohodov D. A., “Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov”, Uchebnik. SPb.: Elmor, 2002. 360 p.

## REFERENCES

1. Pipchenko, O. and Shevchenko, V. (2010). “K voprosu avtomatizirovannogo upravleniya sudnom na traektorii,” *Shipping & Navigation*, vol. 19, pp. 149–155.

2. Pipchenko, O. and Shevchenko, V. (2018). “Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions,” *Marine Intellectual Technologies - Scientific journal*, vol. 4, no. 04, pp. 208–214.

3. Liu, Z. (2019). “Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 834–840, doi: 10.1049/iet-its.2018.5448.

4. Fu, M., Shang, W., and Wang, T. (2019). “Robust Sliding Mode Control-Based Trajectory Tracking Control for an Underactuated Surface Vessel With Prescribed Performance,” 2019 *Chinese Control Conference (CCC)*, doi: 10.23919/chicc.2019.8865240.

5. Zhang, G. et al. (2018). “A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV,” *Ocean Engineering*, vol. 151, pp. 82–92, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.054.

6. Sun, Z., Zhang, G., Yi, B., and Zhang, W. (2017). “Practical proportional integral sliding mode control for underactuated surface ships in the fields of marine practice,” *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 217–223, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.010.

7. Sun, Z., Zhang, G., Yang, J., and Zhang, W. (2017). “Research on the sliding mode control for underactuated surface vessels via parameter estimation,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 91, no. 2, pp. 1163–1175, doi: 10.1007/s11071-017-3937-8.

8. Zheng, Z., Huang, Y., Xie, L., and Zhu, B. (2018). “Adaptive Trajectory Tracking Control of a Fully Actuated Surface Vessel With Asymmetrically Constrained Input and Output,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1851–1859, doi: 10.1109/tcst.2017.2728518.

9. Zheng, Z. and Feroskhan, M. (2017). “Path Following of a Surface Vessel With Prescribed Performance in the Presence of Input Saturation and External Disturbances,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2564–2575, doi: 10.1109/tmech.2017.2756110.

10. Zheng, Z. and Sun, L. (2017). “Error-constrained path-following control for a stratospheric airship with actuator saturation and disturbances,” *International Journal of Systems*

*Science*, vol. 48, no. 16, pp. 3504–3521, doi: 10.1080/00207721.2017.1381889.

11. Zheng, Z., Sun, L., and Xie, L. (2018). “Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel With Actuator Saturation and Faults,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 10, pp. 1794–1805, doi: 10.1109/tsmc.2017.2717850.

12. Fossen, T. I. (2011). “Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control,” doi: 10.1002/9781119994138.

13. Ghommam, J., Ferik, S. E., and Saad, M. (2018). “Robust adaptive path-following control of underactuated marine vessel with off-track error constraint,” *International Journal of Systems Science*, vol. 49, no. 7, pp. 1540–1558, doi: 10.1080/00207721.2018.1460412.

14. Karney, C. F. F. (2012). “Algorithms for geodesics,” *Journal of Geodesy*, vol. 87, no. 1, pp. 43–55, doi: 10.1007/s00190-012-0578-z.

15. Vincenty (1975). “Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations,” *Survey Review*, vol. 23, no. 176, pp. 88–93, doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88.

16. Lukomskij, Yu. A., Peshekhonov, V. G. and Skorohodov, D. A. (2002). “Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov”, Uchebnik. SPb.: Elmor. 360 p.

**Pipchenko O. D., Konon N. M. ENHANCEMENT OF SHIP HANDLING TECHNIQUES ALONG A PREDETERMINED TRAJECTORY**

*The current research examines the complexities and solutions associated with the automation of maritime navigation, focusing on the improvement of automatic devices and systems for controlling the movement along a given trajectory. This paper offers a comprehensive review of contemporary mathematical models, functioning algorithms, and their implementation methodologies, assessing their impact on the effectiveness of trajectory control systems. The potential limitations of certain implementation methods and the corresponding necessity to reassess control laws or to find novel approaches for the parametric and structural identification of the ship handling process are emphasized. The purpose of the research is to refine the methods employed in trajectory-based ship control. The study presents mathematical correlations of motion along linear and curved trajectories and establishes the interconnections between the vessel’s route and the required dynamic parameters for maintaining the ship on its trajectory. The research provides a clear and concise framework that facilitates the comprehension and application of trajectory-based maritime control. The efficiency of the proposed algorithm is confirmed through the simulation of the S-175 container ship’s movement, which not only enhances the value of the research but also lays a robust groundwork for prospective investigations in this field. Looking at future prospects in the field, the researchers plan to continue work in this direction, focusing on further improvement of ship trajectory control methods and studying new approaches to parametric and structural identification of the ship control process. They also plan to conduct further simulations to test the effectiveness of their algorithm and explore its potential applications in other areas of maritime shipping.*

**Key words:** safety of navigation; trajectory control; automated ship systems; ship handling; ship manoeuvring; dynamic parameters of vessel motion.

© Піпченко О. Д., Конон Н. М.

Статтю прийнято  
до редакції 14.11.2023