

АВТОМАТИЧНЕ НАЛАШТУВАННЯ НАДЛИШКОВОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПО ДЕТЕРМІНАНТУ

Зінченко С. М., д.т.н., доцент, професор кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Товстокорий О. М., к.т.н., доцент, завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

Носов П. С., к.т.н., доцент, завідувач кафедри суднових комп'ютерних систем та мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: rason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766;

Онишко Д. М., старший викладач кафедри суднових комп'ютерних систем та мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: Onushkodn@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8394-3091;

Козачок Ю. А., аспірант, розробник програмного забезпечення компанії N-IX LTD, Україна, e-mail: kozak9995@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6430-3961.

Об'єктом дослідження є процеси динамічного позиціонування судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм. Автоматизація процесів керування рухом дозволяє значно підвищити ефективність систем керування за рахунок використання сучасних методів обробки інформації, включаючи оптимізацію. Нові можливості підвищення ефективності систем керування з'явилися з використанням надлишкового керування. У морській галузі надлишкові структури найбільшого поширення набули у системах динамічного позиціонування. Однією із вимог до таких систем є забезпечення максимальної точності процесів позиціонування, у тому числі при дії зовнішніх впливів з будь-якого напрямку. На думку авторів, таку можливість системи керування можна забезпечити максимальним розведенням керуючих векторів структури (максимізацією детермінанту). У роботі розроблено метод налаштування надлишкової структури, який забезпечує таку можливість. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимального стану структури, який визначається максимальним детермінантом, із врахуванням обмежень типу рівностей, для створення структурою необхідних керувань, та типу нерівностей, для врахування обмежень структури по максимальній силі упору і куту повороту гвинтів; переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення. Працездатність та ефективність методу підтверджені математичним моделюванням у середовищі MATLAB.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи; навігаційна безпека; надлишкові структури; оптимальні налаштування; динамічне позиціонування; детермінант структури.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.016-030

Вступ. Автоматизація процесів керування рухом дозволяє значно підвищити ефективність систем керування за рахунок використання сучасних методів обробки інформації, включаючи оптимізацію. Авторами статті, у попередніх роботах, досліджувалися питання автоматизації та оптимізації процесів керування рухом судна для виконання швартових операцій [1], розходження з багатьма маневруючими цілями [2], ідентифікації математичної моделі судна [3] тощо. Нові можливості підвищення ефективності систем керування з'явилися з використанням надлишкового керування. Надлишкові структури виконавчих пристроїв традиційно почали використовуватися для резервування та підвищення надійності систем керування, шляхом виключення із роботи пристроїв, що відмовили. Згодом, вони почали використовуватися також для оптимізації процесів керування у космічній та авіаційній галузі [4], зварювальному виробництві [5], керуванні маніпуляторами тощо. У морській галузі надлишкові структури найбільшого поширення набули у системах динамічного позиціонування [6, 7]. Використання надлишкових структур виконавчих пристроїв суден для оптимізації енергоспоживання і керувань розглядалися

раніше у роботах авторів [8–10], дослідженню мінімально надлишкової структури офшорного судна присвячена робота [11], переналаштування надлишкових структур без збурень розглянуто у роботі [12]. У даній статті досліджується можливість використання надлишкового керування для зменшення динамічних похибок позиціонування. Забезпечення максимальної точності процесів позиціонування, у тому числі при дії зовнішніх впливів з будь-якого напрямку, є однією із найважливіших вимог до таких систем. На думку авторів, таку можливість системи керування можна досягти за рахунок максимального розведення керуючих векторів структури (максимізацією детермінанту).

Об'єктом дослідження є процеси динамічного позиціонування судна з двома кормовими азіподами і носовим підрулюючим пристроєм.

Предметом дослідження є моделі та методи зменшення динамічних похибок позиціонування.

Постановка проблеми. Розробити метод керування надлишковою структурою виконавчих пристроїв судна з двома кормовими азіподами та носовим підрулюючим пристроєм, який дозволив би зменшити динамічні похибки позиціонування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оптимізація процесів керування, використання надлишкових структур для резервування та оптимізації раніше розглядалися у багатьох роботах авторів.

Дослідження системи керування автономним надводним судном, яка б забезпечувала безпечне та точне виконання функціональних завдань за наявності вітру, течії та хвилювання, наведено у роботі [13]. Представлена нова топологія контролера, заснована на поєднанні ПД- регулятора та оптимального керування. Налаштування регулятора сформовані на основі отриманих результатів оптимального керування, що забезпечило мінімізацію модельних невизначеностей. Працездатність та ефективність методу перевірені на математичній моделі реального судна з 3 ступенями свободи (модель DoF). Результати моделювання показали, що ПД-регулятор, налаштований відповідно до запропонованого методу, здатний працювати за різних параметричних невизначеностей.

У статті [14] розглянуті питання оптимального керування стріловими кранами, що використовуються на судах. Модель динамічного стрілового крана лінеаризована шляхом розкладання в ряд Тейлора навколо робочої точки, яка перераховувалася на кожному кроці керування. Для розрахунку коефіцієнта підсилення у каналі зворотного зв'язку регулятора розв'язувалося алгебраїчне рівняння Ріккати. Запропонований підхід до оптимального керування забезпечив швидке та точне відстеження змінних станів стрілових кранів при помірних флуктуаціях вхідних керуючих сигналів.

Дослідженню швидкодії авіаційного маневру Кульбіт, при створенні бази маневрів, присвячена робота [15]. За допомогою методу заміни змінних і накладення функції штрафу, задача оптимального керування з вільним кінцевим станом і часом перетворена у задачу оптимального керування з фіксованим кінцевим станом. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє оптимізувати у часі керування для маневру Кульбіт.

У статті [16] розглянуто швартовий маневр автономного надводного судна (АНС) з використанням модифікованої механіки (тросу). Мала швидкість судна при швартуванні істотно знижує його маневрові можливості, а вітер і хвилювання значно підсилюють цей ефект. Внесок статті в розробку методів швартування АНС з використанням модифікованої механіки полягає у врахуванні провисання каната. Це досягнуто за рахунок використання гладкої штрафної функції та лінійного комплементарного рішення.

У статті [17] досліджено задачу оптимізації вертикального зниження космічного корабля під час посадки на планету, з урахуванням обмежень на глісаду та тягу двигуна. В якості критерію оптимальності прийнята функція мінімізації енерговитрат. Вперше доведено форму Max-Min-Max або Max-Singular-Max оптимального керування за принципом максимуму Понтрягіна. Отриманий результат поширено на задачі керування з урахуванням впливу атмосфери. Показано, що сингулярна структура не виникає в розширених задачах керування.

Так, у роботі [18] розглянуті питання підвищення надійності підшипників з магнітним підвісом у конструкціях із резервуванням, за рахунок реконфігурації конструкції у разі відмови окремих компонентів. Коефіцієнт струму зміщення є одним із ключових факторів у стійкому до відмов контролі. Авторами розроблено метод оптимізації коефіцієнта струму зміщення в резервній структурі. За допомогою математичного аналізу діапазону зміни коефіцієнта струму зміщення доведено існування оптимального рішення. Розроблено алгоритми пошуку оптимального рішення.

У статті [19] розглянуті питання створення відмовостійкої системи рульового керування безпілотних підводних апаратів. Проведений авторами аналіз показав, що надійність системи керування, яка використовує стратегію та алгоритми керування резервуванням, значно краща, ніж традиційна конфігурація.

Методи керування резервною структурою електрогідравлічних приводів на основі нечіткої агрегації, правил нечіткої логіки Мамдані та теорії нечітких нейронних мереж досліджено в [20].

У керівництві [21] містяться рекомендації щодо практичного маневрування судном з двома кормовими азимутальними пристроями (АП). Розглянуто можливості кількох фіксованих режимів. Враховуючи, що ці режими реалізуються вручну, кути АП у всіх режимах вибираються кратними 45 крім режимів швидкого переміщення вліво та вправо. Структура з двома кормовими АП може виникнути, коли носовий і кормовий підрулюючі пристрої виходять з ладу через засмічення піском або мулом. Така конструкція є останнім «рубжем», який забезпечує тривимірне керування, тому вона особливо цікава.

У статті [22] розроблено відмовостійкий контролер для адаптивної висотної конструкції, який здатний адаптуватися до множинних відмов приводів і є важливим кроком для автоматизації адаптивних структур. Запропонований закон керування складається з двох частин – статичної компенсації зміщення, яка протидіє постійній силі, прикладеній несправними приводами до механічної конструкції, та реконфігурованого лінійного квадратичного регулятора, який оптимально мінімізує вібрації конструкції за допомогою решти функціонуючих приводів. Запропонований підхід перевірено моделюванням в умовах вітрових збурень. Результати моделювання показали, що відмовостійка схема керування забезпечує більш ефективну роботу системи (до 33% у порівнянні з номінальним контролером).

У статті [23] задача синтезу системи керування літальним апаратом пов'язана з можливістю структурної перебудови (реконфігурації) законів керування при збереженні динамічних властивостей замкнутого контуру «літак – система керування» у разі відмов і пошкоджень.

Модульні повітряні роботизовані системи (Modular Aerial Robotic Systems, MARS) складаються з багатьох модулів-дронів, зібраних в єдину інтегровану літаючу платформу. Завдяки вбудованій надлишковості MARS може самостійно змінювати конфігурацію для пом'якшення несправностей та підтримування стабільного польоту. В наявних роботах із самореконфігурації MARS часто не враховується практична керованість проміжних структур, що обмежує їхню застосовність. У статті [24] розглянута динамічна модель MARS із врахуванням обмежень проміжних структур та запропоновано надійний і ефективний алгоритм самовідновлення, який максимізує запас керованості на кожному проміжному етапі.

Резервування керуючих поверхонь дає можливість системі керування реконфігурувати закон керування при виникненні несправностей під час польоту. У роботі [25] запропоновано можливі несправності розділити на дві категорії: передбачувані та непередбачувані. Передбачувані несправності обробляються адаптивною схемою перемикання між моделями. Непередбачувані несправності обробляються простою адаптивною схемою керування, щоб змусити станцію з несправностями відстежувати задану еталонну модель. Результати моделювання показали, що розроблена стратегія реконфігурації здатна швидко виявити несправність і стабілізувати літальний апарат.

Модульні самореконфігуровані космічні кораблі (MSRS) складаються з однорідних або різнорідних модулів, які можуть автономно трансформувати конфігурацію без зовнішнього втручання. У статті [26] розглянуті ключові технології MSRS. Описано концепції модульних реконфігурованих космічних апаратів (MRS) і MSRS та проаналізовано переваги останнього. Введені типові MSRS. Проаналізовано ключові технології MSRS: технологія проектування складальної конструкції, технологія оптимізації конфігурації місії, технологія планування самостійної реконфігурації та технологія кооперативного керування позиціями. Представлені тенденції розвитку MSRS.

Оптимізація відіграє вирішальну роль у керуванні кінематичним рухом надлишкових маніпуляторів. Чинні кінематичні схеми не враховують оптимізацію маніпулятивності, або вимагають перетворення неопуклої задачі в опуклу, що може вплинути на оптимальну маніпулятивність. Також, чинні кінематичні схеми рідко враховують перешкоди. У роботі [27] пропонується оптимізація маніпулятивності з використанням рекурентної нейронної мережі (metaheuristic-based recurrent neural network MRNN) на основі метаевристики, яка може безпосередньо обробляти нелінійну та невикуклу задачу з обмеженнями та забезпечувати досягнення глобального оптимуму. Наведені результати комп'ютерного моделювання та фізичних експериментів, які демонструють переваги запропонованої схеми.

Оптимізація функціональної надлишковості є одним із найефективніших способів покращити продуктивність робота. Компроміс між плавністю руху робота та іншими важливими аспектами робить проблему оптимізації надто нелінійною, яку неможливо розв'язувати при фрезерних операціях. У статті [28] показано, що рух робота буде приблизно плавним, коли функціональні надлишковості різця є змінними функції згладжування. На цій основі побудовано сурогатну модель Лежандра для планування оптимальної функціональної надлишковості, яка дозволяє значно скоротити обчислення. Результати реального експерименту з фрезерування тривимірних S-подібних канавок запропонованим методом показали, що, у порівнянні із відомими методами, досягається більша продуктивність фрезерування та ефективність обчислень.

У роботі [29] розглянуті питання максимізації керуючого моменту у каналі рискання суден з надлишковими структурами виконавчих пристроїв.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення динамічних похибок позиціонування офшорного судна з двома кормовими азіподами і носовим підрулюючим пристроєм. Задачами дослідження є: визначення матриці стану структури та її мінорів; знаходження сингулярних станів та станів, максимально віддалених від сингулярних; розробка методу оптимального налаштування по детермінанту; вибір та налаштування процедури умовної оптимізації; перевірка працездатності та ефективності методу математичним моделюванням.

Основна частина. Схема керування судном з двома кормовими азіподами і носовим підрулюючим пристроєм наведена на рис. 1.

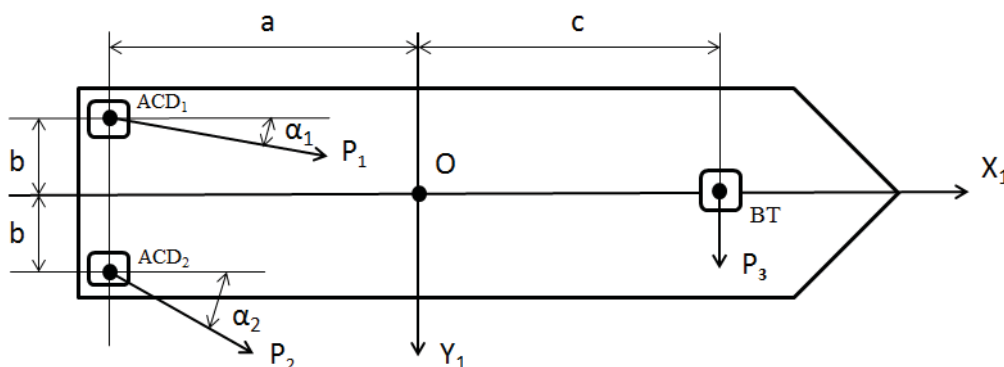


Рисунок 1 – Схема керування судном з двома кормовими азіподами і носовим підрулюючим пристроєм

На рисунку зображена зв'язана система координат (ЗСК) $OX_1Y_1Z_1$, початок якої знаходиться у центрі обертання судна. Вісь OX_1 лежить у діаметральній площині судна, паралельна палубі судна і направлена в носову частину судна. Вісь OY_1 перпендикулярна діаметральній площині судна і направлена в сторону правого борту. Вісь OZ_1 доповнює систему до «правої». Також на рисунку зображено два кормових аzipоду ACD_1 та ACD_2 і носовий підрулюючий пристрій ВТ. Положення першого аzipоду ACD_1 у ЗСК визначається координатами $(-a, -b, 0)$; положення другого аzipоду ACD_2 у ЗСК визначається координатами $(-a, b, 0)$; положення носового підрулюючого пристрою ВТ у ЗСК визначається координатами $(c, 0, 0)$. Перший аzipод ACD_1 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_1 = (P_1 \cos \alpha_1, P_1 \sin \alpha_1)$, де P_1 – модуль сили упору гвинта першого аzipоду, α_1 – кут повороту першого аzipоду, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_1| \leq P_1^{\max}$, $|\alpha_1| \leq \pi$. Другий аzipод ACD_2 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_2 = (P_2 \cos \alpha_2, P_2 \sin \alpha_2)$, де P_2 – модуль сили упору гвинта другого аzipоду, α_2 – кут повороту другого аzipоду, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_2| \leq P_2^{\max}$, $|\alpha_2| \leq \pi$. Носовий підрулюючий пристрій створює бокову силу $\mathbf{P}_3 = (0, P_3)$, яка обмежена величиною $|\mathbf{P}_3| \leq P_3^{\max}$. Запишемо матрицю стану структури із векторів $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \\ 0 & P_3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матриця $\mathbf{S}[3,2]$ прямокутна і її ранг визначається найбільшим порядком не нульового мінору. Запишемо мінори другого порядку матриці $\mathbf{S}[3,2]$.

Перший мінор

$$M_1 = \begin{vmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

$$\det M_1 = P_1 P_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - P_1 P_2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 = P_1 P_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (3)$$

$$\det M_1 = 0 \rightarrow (\alpha_2 - \alpha_1) = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Другий мінор

$$M_2 = \begin{vmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ 0 & P_3 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$\det M_2 = P_1 P_3 \cos \alpha_1, \quad (6)$$

$$\det M_2 = 0 \rightarrow \alpha_1 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

Третій мінор

$$M_3 = \begin{vmatrix} P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \\ 0 & P_3 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$\det M_3 = P_2 P_3 \cos \alpha_2, \quad (9)$$

$$\det M_3 = 0 \rightarrow \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

У загальному випадку всі три визначники мінорів не дорівнюють нулю і матриця стану структури має ранг $\text{rang}(\mathbf{S}) = 2$, тобто структура у всіх випадках, за виключенням сингулярних (вироджених) станів, може створювати керування у площині OX_1Y_1 . Сингулярні стани структури визначаються рівнянням

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

отриманим із рівнянь (4), (7), (10), коли всі три мінори другого порядку дорівнюють нулю.

У сингулярних станах вектори $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$ колінеарні, ранг матриці стану $\text{rang}(\mathbf{S}) = 1$ і структура втрачає можливість створювати керуючу силу вздовж осі OX_1 .

При практичному застосуванні бажано утримувати стан структури подалі від сингулярного, що досягається максимізацією визначників мінорів

$$|\det M_1| = P_1 P_2 |\sin(\alpha_2 - \alpha_1)| \rightarrow \max, (\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

$$|\det M_2| = P_1 P_3 |\cos \alpha_1| \rightarrow \max, \alpha_1 = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

$$|\det M_3| = P_2 P_3 |\cos \alpha_2| \rightarrow \max, \alpha_2 = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Умови (12)–(14) не мають сумісного рішення, проте, використання будь-якої із них гарантує максимальну віддаленість структури від сингулярного стану і створення найкращої керованості судном. Це дозволяє зменшити динамічну затримку системи керування та похибки, викликані цією затримкою. Також, умови (12)–(14) можна використовувати для реконфігурації структури при відмові одного із виконавчих пристроїв, а саме, умову (12) – при відмові НПП, умову (13) – при відмові ACD_2 , умову (14) – при відмові ACD_1 .

Умови (12)–(14) є цільовими функціями, які максимізують визначник (детермінант) структури і забезпечують найкращу керованість судном. Також, додатково потрібно враховувати обмеження типу рівностей, які забезпечують створення структурою необхідних керуючих сил і моментів, а також обмеження типу нерівностей, які враховують допустимі діапазони зміни параметрів структури

$$\begin{cases} Q = |\sin(\alpha_2 - \alpha_1)| \rightarrow \max \\ P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 - P_x^* = 0 \\ P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + P_3 - P_y^* = 0 \\ P_1 b \cos \alpha_1 - P_2 b \cos \alpha_2 - P_1 a \sin \alpha_1 - P_2 a \sin \alpha_2 + P_3 c - M_z^* = 0 \\ |P_1| \leq P_1^{\max}, |\alpha_1| \leq \pi \\ |P_2| \leq P_2^{\max}, |\alpha_2| \leq \pi \\ |P_3| \leq P_3^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

Вирішення оптимізаційної задачі (15) проводиться у бортовому обчислювачі із використанням процедури нелінійної оптимізації з обмеженнями типу рівностей та нерівностей.

Математичне моделювання процесів динамічного позиціонування. Для підтвердження працездатності та ефективності розробленого методу проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB. Основні характеристики математичної моделі судна відповідають характеристикам офшорного судна ESNAAD-224 і наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики математичної моделі судна

Найменування параметра	Значення параметра
Маса судна m , кг	$4,02e^6$
Довжина судна L , м	70,4
Ширина судна B , м	15,77
Осадка судна d , м	4,85
Максимальна швидкість судна $V_{\max}$, м/с	5,5
Діапазон зміни сили упору гвинта першого P_1 та другого P_2 аzipоду, н	$\pm 2,27e^5$
Діапазон зміни сили упору гвинта НПП, н	$\pm 0,57e^5$
Діапазон кута повороту гвинта першого α_1 та другого α_2 аzipоду, рад	$\pm \pi$

Для моделювання використовувалися: диспетчер задач (організація виклику процедур, формування масивів для побудови графіків); модель об'єкта керування (система 17 диференціальних рівнянь, із них 6 динамічних рівнянь лінійного та кутового руху судна, 6 кінематичних рівнянь лінійного та кутового руху судна, 5 диференціальних рівнянь, які враховують інерційність зміни сили упору гвинта і кута повороту гвинта першого та другого аzipодів, а також сили упору гвинта носового підрулюючого пристрою); модель системи керування (розрахунок керуючих сил і моменту рискання, необхідних для підтримування заданої позиції або переміщення, вирішення задачі умовної оптимізації (15); модель зовнішніх впливів; метод інтегрування Рунге-Кути 4-го порядку; тощо. У якості процедури умовної оптимізації використовувалася процедура MATLAB

$$f \min \text{con}(@ \text{func}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{b}_{eq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ \text{nonlcon}), \quad (16)$$

де $@ \text{func}$ – посилання на цільову функцію, $\mathbf{x0} = (P_1(0), \alpha_1(0), P_2(0), \alpha_2(0), P_3(0))$ – початковий вектор стану структури, $\mathbf{A}$ – матриця системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутня, $\mathbf{b}$ – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутній, $\mathbf{A}_{eq}$ – матриця системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутня, $\mathbf{b}_{eq}$ – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутній, $\mathbf{lb} = (-P_1^{\max}, -\pi, -P_2^{\max}, -\pi, -P_3^{\max})$ – нижні значення параметрів керувань, $\mathbf{ub} = (P_1^{\max}, \pi, P_2^{\max}, \pi, P_3^{\max})$ – верхні значення параметрів керувань, $@ \text{nonlcon}$ – посилання на файл нелінійних обмежень типу рівностей.

Експеримент 1. Мета експерименту: перевірка можливості переналаштування структури у нестационарних режимах руху судна. Умови експерименту: під час поздовжнього переміщення судна провести переналаштування структури у стан з максимальним детермінантом.

Результати моделювання наведені на рис. 2 у вигляді графіків зміни у часі: поздовжньої швидкості $V_x[\text{м/с}]$ та поздовжнього переміщення $X_g[\text{м}]$ судна, бокової швидкості $V_y[\text{м/с}]$ та бокового переміщення $Y_g[\text{м}]$ судна, кутової швидкості $\omega_z[\text{град/с}]$ та кута рискання $\Psi[\text{град}]$ судна, сили упору гвинта $P_1[\text{н}]$ та кута повороту гвинта $\alpha_1[\text{гр}]$ першого аzipоду, сили упору гвинта $P_2[\text{н}]$ та кута повороту гвинта $\alpha_2[\text{гр}]$ другого аzipоду, сили упору гвинта $P_3[\text{н}]$ носового підрулюючого пристрою, значення детермінанту структури

Det , сумарної поздовжньої сили структури $P_x[n]$, сумарної бокової сили структури $P_y[n]$ та сумарного моменту рискання $M_z[nm]$.

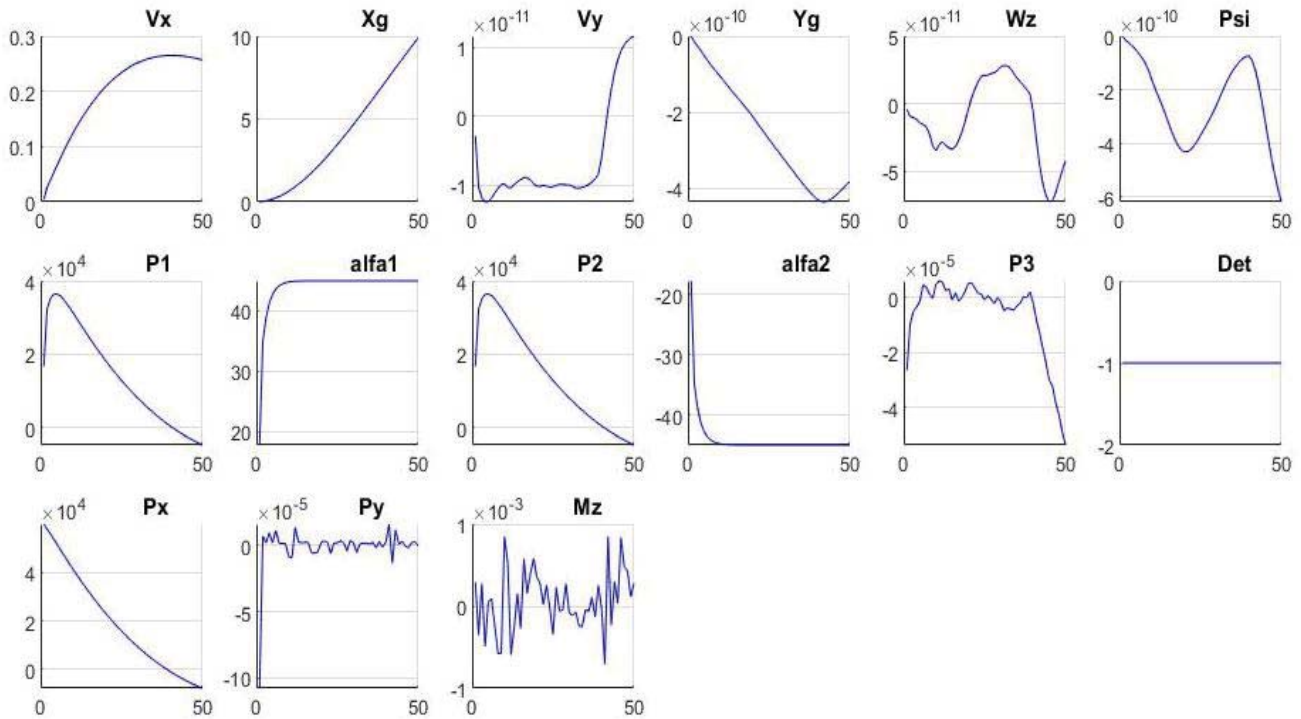


Рисунок 2 – Переналаштування структури в режимі нестационарного руху судна

Як видно із графіків $V_x(t), X_g(t)$, судно збільшує швидкість та переміщується у поздовжньому напрямку. Одночасно, відбувається переналаштування структури – вектор сили упору гвинта першого аzipоду повертається з початкового положення $\alpha_1(0) = 0^\circ$ у положення $\alpha_1(t) = 45^\circ$, а вектор сили упору гвинта другого аzipоду повертається з початкового положення $\alpha_2(0) = 0^\circ$ у положення $\alpha_2(t) = -45^\circ$. На момент завершення переналаштування, кут між вектором сили упору гвинта першого аzipоду і вектором сили упору гвинта другого аzipоду становить $\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ (вектори перпендикулярні), а детермінант структури дорівнює $Det(t) = -1$ (структура максимально віддалена від сингулярного стану). Під час переналаштування, відхилення у каналах бокового руху $V_y(t), Y_g(t)$ та кутового руху $\omega_z(t), Psi(t)$ незначні. Також, на графіках видно незначні зміни бокової сили $P_y(t)$ та керуючого моменту структури у каналі рискання $M_z(t)$. Значні зміни поздовжньої сили структури $P_x(t)$ викликані необхідністю розгону та гальмування судна при переміщенні.

Висновок по експерименту 1. Розроблений метод дозволяє переналаштовувати надлишкову структуру у положення максимального детермінанта без збурень.

Експеримент 2. Мета експерименту: визначення динамічних похибок позиціонування судна при використанні надлишкової структури, налаштованої на максимальний детермінант. Умови експерименту: моделювання процесів динамічного позиціонування за наявності поривів вітру. Результати математичного моделювання наведені у вигляді графіків у часі, рис. 3, та на фазовій площині $X_g[m] - Y_g[m]$, рис. 4.

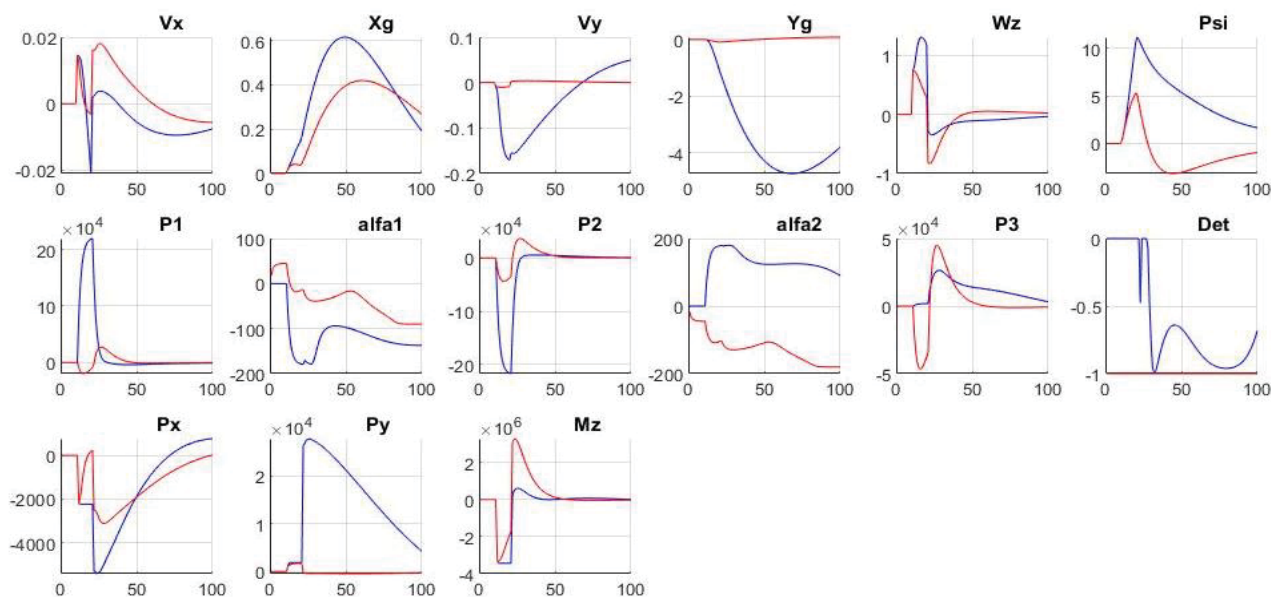


Рисунок 3 – Динамічні похибки позиціонування при використанні надлишкової структури, оптимізованої по детермінанту і мінімальному енергоспоживанню

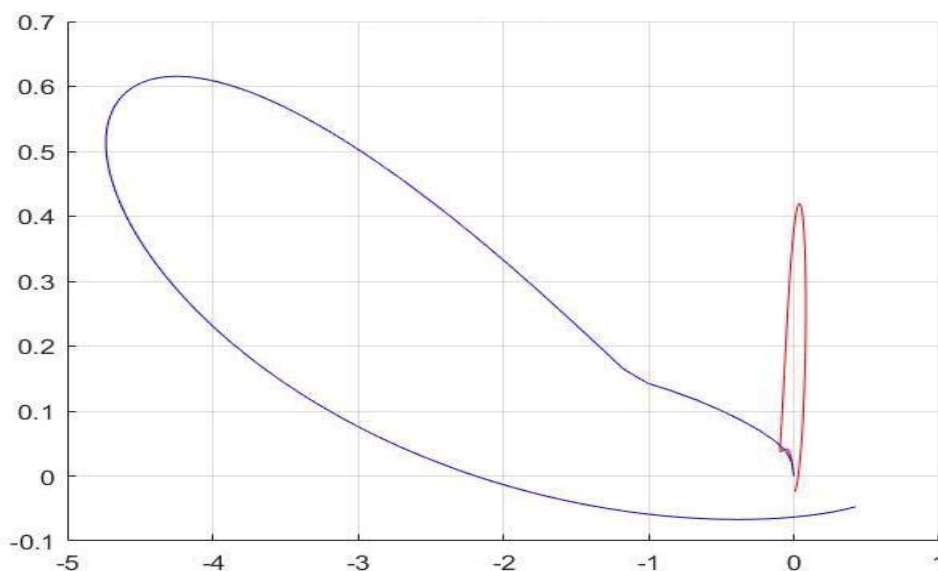


Рисунок 4 – Динамічні похибки позиціонування на фазовій площині

Червоним кольором зображені графіки, отримані з використанням методу оптимізації структури по детермінанту, а синім кольором зображені графіки, отримані з використанням методу мінімізації енергоспоживання, раніше описаному у роботах [8–11].

Початкові значення всіх параметрів дорівнюють нулю. На інтервалі часу $t \in [10 - 12]c$ імітується перший порив вітру швидкістю $W = 15 м/с$ і напрямком $K_W = 45^\circ$. На інтервалі часу $t \in [20 - 22]c$ імітується другий порив вітру швидкістю $W = 15 м/с$ і напрямком $K_W = -45^\circ$.

Із наведених результатів видно, що в інтервалі часу дії поривів вітру $t \in [10 - 12]c$ та $t \in [20 - 22]c$ з'являються динамічні похибки позиціонування в каналах поздовжнього $V_x(t), X_g(t)$, бокового $V_y(t), Y_g(t)$ та кутового $\omega_z(t), Psi(t)$ руху, а також керуючі сили $P_x(t), P_y(t)$ та момент $M_z(t)$ структури для відпрацювання цих похибок. Із графіка $Det(t)$, рис. 3, видно, що керування структурою по детермінанту постійно підтримує максимальне (за модулем) значення детермінанта, у той час як цільова функція мінімального

енергоспоживання допускає зміну значення детермінанта в межах $0 \leq |Det(t)| \leq 1$, включаючи значення $Det(t) = 0$. Із графіків $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ також видно, що $|\alpha_1(t) - \alpha_2(t)| = \frac{\pi}{2}$, тобто керуючі вектори P_1, P_2 завжди ортогональні.

Як видно із наведених графіків, динамічні похибки, при налаштуванні структури на максимальний детермінант, суттєво менші динамічних похибок, при налаштуванні структури на мінімальне енергоспоживання. Максимальні відхилення параметрів, при дії зовнішніх впливів, для розглянутих законів керування, зведені у таблицю 2.

Таблиця 2 – Динамічні похибки позиціонування

Закон керування	$\Delta V_x [м/с]$	$\Delta X_g [м]$	$\Delta V_y [м/с]$	$\Delta Y_g [м]$	$\Delta \omega_z [зр/с]$	$\Delta Psi [зр]$
$Q_1 = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \rightarrow \min$	0,02	0,6	0,15	5,0	1,3	11
$Q_2 = \det M_1 \rightarrow \max$	0,018	0,4	0,01	0,1	0,8	2,5

Висновок по експерименту 2. Налаштування надлишкової структури по максимальному детермінанту дозволяє зменшити динамічні похибки позиціонування, у порівнянні із відомим методом мінімального енергоспоживання.

Основні результати та їх обговорення. Розроблено метод налаштування надлишкової структури виконавчих пристроїв судна, який дозволяє, під час проведення операцій динамічного позиціонування, зменшити динамічні похибки та підвищити точність. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача, знаходженням, на кожному кроці бортового обчислювача, оптимального стану структури, що визначається максимальним детермінантом, шляхом вирішення задачі умовної оптимізації, із врахуванням обмежень типу рівностей (для одночасного формування необхідних керувань), та типу нерівностей (для врахування фізичних обмежень структури на силу упору та кути повороту гвинтів); переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють налаштовувати та підтримувати надлишкову структуру у положенні з максимальним детермінантом, що дозволяє зменшити динамічні похибки системи керування. Метод розроблений для використання в бортовому обчислювачі автоматичної / автоматизованої системи керування рухом судна з надлишковими структурами виконавчих пристроїв і не може використовуватися для ручного керування, або на судах без надлишкового керування. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися при розробці автоматичних / автоматизованих систем керування рухом суден з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з розробкою методів переналаштування для інших структур виконавчих пристроїв.

Висновки. Проведено аналіз літературних джерел, у яких розглядалися питання оптимального керування та використання надлишкових структур для підвищення надійності систем керування і оптимізації. Встановлено, що найближчі технічні рішення реалізовані в системах динамічного позиціонування, які дозволяють використовувати надлишкові структури як для підвищення надійності, так і для оптимізації процесів керування. Разом з тим, серед відомих рішень авторами не знайдено таких, що дозволяють використовувати надлишкові структури для зменшення динамічних похибок шляхом налаштування та підтримування структури у положенні з максимальним детермінантом. Розроблено метод керування надлишковою структурою офшорного судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм, який дозволяє зменшити динамічні похибки позиціонування. Працездатність та ефективність методу перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимального стану структури, який визначається максимальним

детермінантом, із врахуванням обмежень типу рівностей, що визначають необхідні керування для підтримування позиції або заданого руху, та типу нерівностей, що враховують обмеження структури; переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці методу керування надлишковою структурою, що оптимізує детермінант структури та забезпечує зменшення динамічних похибок позиціонування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у перевірці працездатності та ефективності методу математичним моделюванням, можливості використання методу при розробці систем автоматичного / автоматизованого керування суднами з надлишковими структурами виконавчих пристроїв, для підвищення точності динамічного позиціонування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Grosheva O. A. Synthesis of optimal control of a vessel with boundary conditions, *Scientific Bulletin of the KhSMA*. 2018, Vol. 1 (18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
2. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Shalaeva A. A. Calculation and implementation of the maneuver of divergence from target vessels in the on-board digital computer. *Materials of the 4-st International Scientific and Practical Conference "Safety of life in transport and information technology, science, practice"*, Kherson, 14–16 spring 2017, pp. 230–235.
3. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G. Using a neural network model of a vessel to solve control problems, *Scientific Bulletin of the KhDMA*. 2017, Vol. 2 (17), pp. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
4. Jacobellis G., Gandhi F., Floros M. Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds. *Journal of the american helicopter society*. 2019. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.
5. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.
6. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M., Kuuskoski J. Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels. *Marine Propulsion*. 1999. <https://library.e.abb.com/public/2314773146eb2d77c1256ec300341511/12-18%20ENG%209902.pdf>.
7. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. *The International Marine Contractors Association*. 2019. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.
8. Zinchenko S., Kobets V., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I. Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023, Vol-3403, pp. 582–594. <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper44.pdf>.
9. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Grosheva O. A. Optimal control of redundant azipod structures, *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 13–15, 2018, pp. 78–81.
10. Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S. The use of excessive actuators structures in automatic vessel movement control systems. *Materials of the III International Maritime Scientific Conference of the ship power plants and technical operation department of odessa national maritime university (MPP&O-2021)*, Odessa, April 29–30, 2021, p.p. 466–472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.
11. Zinchenko S. Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices. *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 9–12, 2020, p. 319–325.

12. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mamenko P. P., Moiseenko V. S., Mateichuk V. M., Kyrychenko K. V., Polishchuk V. O. Use of zero movements for adjustment of redundancy structures, *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2021)"*, Kherson: KhDMA, November 3–4, 2021.
13. Santos M. F., Santos Neto A. F., Honorio L., Silva M. F., Mercorelli P. Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes. *IEEE Access*. 2023, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
14. Rigatos G. A. Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes. *Ships and Offshore Structures*. 2022. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
15. Bao X., Jiang C. Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control. Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control*. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454.
16. Bartels S., Helling S., Meurer T. Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers. *IFAC-PapersOnLine*. 2023, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
17. Leparoux C., Herisse B., Jean F. Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints. *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. 2022. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
18. Cheng X., Deng S., Cheng B., Meiqian L., Zhou R. Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*. 2020. 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
19. Huang W., Xu H., Wang J., Miao C., Ren Y., Wang L. Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle. *5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings*, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.
20. Li W., Shi G. Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.
21. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). *United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA)*, Transport House, London. 2013. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.
22. Dakova S., Wagner J. L., Gienger A., Tarín C., Böhm M., Sawodny O. Reconfiguration Strategy for Fault-Tolerant Control of High-Rise Adaptive Structures. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021, Vol. 6, Issue: 4. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093861>.
23. Gulay T. A., Zakharov V. V., Kron R. V., Litvin D. B., Popova S. V. Mathematical model of reconfiguration of the aircraft integrated control system on the basis of embedding systems technology, *AIP Conf. Proc.* 2021, Vol. 2402, Issue 1, 070052. <https://doi.org/10.1063/5.0074028>.
24. Huang R., Tang S., Cai Zh., Zhao L. Robust Self-Reconfiguration for Fault-Tolerant Control of Modular Aerial Robot Systems. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09376>. <https://arxiv.org/pdf/2503.09376>.
25. Wen J., Song Ya., Wang H., Han D., Yang Ch. Hybrid Adaptive Control for Tiltrotor Aircraft Flight Control Law Reconfiguration, *Aerospace*. 2023. 10(12): 1001. <https://doi.org/10.3390/aerospace10121001>.
26. Hu G., Li Ya., Li X., Zhang G., Zhang Zh., Wang X., Man W. Modular self-reconfigurable spacecraft: Development status, key technologies, and application prospect, *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 207, pp. 240–256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.03.012>.
27. Tan J., Shang M., Jin L. Metaheuristic-Based RNN for Manipulability Optimization of Redundant Manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024, Vol. 20, Issue 4, 6489–6498. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3348830>.

28. Liu Y., Chen X., Wu L., Huang G., Luo J., Huang Yu. Global optimization of functional redundancy in a 6R robot for smoothing five-axis milling operations, *Engineering Optimization*. 2024, Vol. 56, Issue 1, pp. 138–154. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2147519>.

29. Gritsuk I., Nosov P., Bondarchuk A., Bondarchuk O. Using redundant control to optimize control torque, *Technology audit and production reserves*. 2023, 3(2(71)):20–24. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.282042>.

REFERENCES

1. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Synthesis of optimal control of a vessel with boundary conditions, *Scientific Bulletin of the KhSMA*, Vol. 1 (18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.

2. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Calculation and implementation of the maneuver of divergence from target vessels in the on-board digital computer, *Materials of the 4-st International Scientific and Practical Conference "Safety of life in transport and information technology, science, practice"*, Kherson, 14–16 spring 2017, pp. 230–235.

3. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G. (2017). Using a neural network model of a vessel to solve control problems, *Scientific Bulletin of the KhDMA No. 2 (17)*, pp. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.

4. Jacobellis, G., Gandhi, F., Floros, M. (2019). Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds, *Journal of the american helicopter society*. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.

5. Gao, W., Tang, Q., Yao, J., Yang, Y. (2020). Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.

6. Pakaste, R., Laukia, K., Wilhelmson, M., Kuuskoski, J. (1999) Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels, *Marine Propulsion*. <https://library.e.abb.com/public/2314773146eb2d77c1256ec300341511/12-18%20ENG%209902.pdf>.

7. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. (2019). The International Marine Contractors Association. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.

8. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych I. (2023). Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol-3403, pp. 582–594. <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper44.pdf>

9. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Optimal control of redundant azipod structures, *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 13–15, 2018, pp. 78–81.

10. Cherniavskiy, V. V., Zinchenko, S. M., Nosov, P. S. (2021). The use of excessive actuators structures in automatic vessel movement control systems, *Materials of the III International Maritime Scientific Conference of the ship power plants and technical operation department of odessa national maritime university (MPP&O-2021)*, Odessa, April 29–30, 2021, p.p. 466–472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.

11. Zinchenko, S. (2020). Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices, *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 9–12, 2020, p. 319–325.

12. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Mamenko, P. P., Moiseenko, V. S., Mateichuk, V. M., Kyrychenko, K. V., Polishchuk, V. O. (2021). Use of zero movements for adjustment of redundancy structures, *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2021)"*, Kherson: KhDMA, November 3–4, 2021.

13. Santos, M. F., Santos Neto, A. F., Honorio, L., Silva, M. F., Mercorelli, P. (2023). Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes, *IEEE Access*, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
14. Rigatos, G. A. (2022). Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
15. Bao, X., Jiang, C. (2023). Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control. Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control*. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454.
16. Bartels, S., Helling, S., Meurer, T. (2023). Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
17. Leparoux, C., Herisse, B., Jean, F. (2022). Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints, *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
18. Cheng, X., Deng, S., Cheng, B., Meiqian, L., Zhou, R. (2020). Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*, 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
19. Huang, W., Xu, H., Wang, J., Miao, C., Ren, Y., Wang, L. (2020). Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle, 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.
20. Li, W., Shi, G. (2020). Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.
21. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). (2013). United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA), Transport House, London. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.
22. Dakova, S., Wagner, J. L., Gienger, A., Tarín, C., Böhm, M., Sawodny, O. (2021). Reconfiguration Strategy for Fault-Tolerant Control of High-Rise Adaptive Structures, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, Issue: 4, 2021. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093861>.
23. Gulay, T. A., Zakharov, V. V., Kron, R. V., Litvin, D. B., Popova, S. V. (2021). Mathematical model of reconfiguration of the aircraft integrated control system on the basis of embedding systems technology, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 2402, Issue 1, 070052. <https://doi.org/10.1063/5.0074028>.
24. Huang, R., Tang, S., Cai, Zh., Zhao, L. (2025). Robust Self-Reconfiguration for Fault-Tolerant Control of Modular Aerial Robot Systems, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09376>. <https://arxiv.org/pdf/2503.09376>.
25. Wen, J., Song, Ya., Wang, H., Han, D., Yang, Ch. (2023). Hybrid Adaptive Control for Tiltrotor Aircraft Flight Control Law Reconfiguration, *Aerospace* 10(12), 1001. <https://doi.org/10.3390/aerospace10121001>.
26. Hu, G., Li, Ya., Li, X., Zhang, G., Zhang, Zh., Wang, X., Man, W. (2023). Modular self-reconfigurable spacecraft: Development status, key technologies, and application prospect, *Acta Astronautica*, Vol. 207, P. 240–256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.03.012>.
27. Tan, J., Shang, M., Jin, L. (2024). Metaheuristic-Based RNN for Manipulability Optimization of Redundant Manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 20, Issue 4, 6489–6498. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3348830>.
28. Liu, Y., Chen, X., Wu, L., Huang, G., Luo, J., Huang, Yu. (2024). Global optimization of functional redundancy in a 6R robot for smoothing five-axis milling operations, *Engineering Optimization* Vol. 56, Issue 1, pp. 138–154. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2147519>.

29. Gritsuk, I., Nosov, P., Bondarchuk, A., Bondarchuk, O. (2023). Using redundant control to optimize control torque, *Technology audit and production reserves* 3(2(71)):20–24, <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.282042>.

Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M., Nosov P. S., Onyshko D. M., Kozachok Yu. A. AUTOMATIC ADJUSTMENT OF THE DYNAMIC POSITIONING SYSTEM REDUNDANT STRUCTURE BY DETERMINANT

The object of the study is the dynamic positioning processes of a vessel with two stern azipods and a bow thruster. Automation of motion control processes allows to significantly increase the efficiency of control systems by using modern methods of information processing, including optimization, and is used in many industries: space, aviation, marine, welding production, etc. New opportunities for increasing the efficiency of control systems have appeared with the use of redundant control. Redundant structures of actuators have traditionally been used for redundancy and increasing the reliability of control systems by excluding failed devices from operation. Over time, they have also been used to optimize control processes. In the marine industry, redundant structures have become most widespread in dynamic positioning systems. One of the requirements for such systems is to ensure maximum accuracy of positioning processes, including under the influence of external influences from any direction. According to the authors, this ability of the control system can be ensured by maximum dilution of the control vectors of the structure (maximization of the determinant). The paper developed a method for tuning a redundant structure that provides this possibility. The obtained result is explained by: using the on-board computer in the control system; finding the optimal state of the structure at each step of the on-board computer, which is determined by the maximum determinant, taking into account the constraints of the type of equalities, to create the necessary controls by the structure, and the type of inequalities, to take into account the constraints of the structure on the maximum thrust force and the angle of rotation of the screws; reconfiguring the structure to a certain optimal position. The operability and effectiveness of the method are confirmed by mathematical modeling in the MATLAB environment. The modeling results showed that the reconfiguration of the structure can be carried out against the background of the execution of the main functional tasks, without creating disturbing forces and moments. The obtained results are reproducible and can be used in the design of dynamic positioning systems.

Key words: intelligent transportation systems; navigational safety; redundant structures; optimal settings; dynamic positioning; structure determinant.

© Зінченко С. М., Товстокорий О. М., Носов П. С., Онишко Д. М., Козачок Ю. А.

Статтю прийнято до редакції 21.04.2025