

ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

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.

Питання зменшення енергоспоживання на судах, а також пов'язані з цим питання скорочення викидів та покращення стану навколишнього середовища є особливо актуальними. Шляхи вирішення цих питань різні, але найчастіше використовуються конструктивні рішення, гідродинамічні рішення, вітрила або сучасні силові установки. Зменшення енергоспоживання також можна досягти за рахунок правильного планування маршруту, психологічної підготовки екіпажу, автоматизації процесів керування рухом. У статті запропоновано метод мінімізації енергоспоживання за рахунок використання надлишкового керування. Надлишкові структури виконавчих пристроїв широко використовуються на сучасних судах, зокрема, на судах з динамічною системою позиціонування. Традиційне призначення надлишкових структур – збільшення надійності системи керування по виконавчим пристроям та підвищення маневрових можливостей судна. Запропонований метод використовує наявні на судах надлишкові структури ще й для мінімізації витрат палива. Отриманий результат пояснюється знаходженням оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі автоматизованої системи оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Працездатність та ефективність розробленого методу підтверджена математичним моделюванням у середовищі MATLAB. Результати проведеного експерименту показали, що використання розробленого методу дозволяє знизити енерговитрати на (35–50)%. При цьому, додаткове навантаження на розрахунковий такт бортового обчислювача не перевищує 25–50 мс, що становить (2,5–5)% всього навантаження.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи; людський чинник; навігаційна безпека; надлишкові керування; мінімізація енергоспоживання; умовна оптимізація.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.163-173

Вступ. Питання мінімізації енергоспоживання на судах, а також пов'язані з цим питання скорочення викидів та покращення стану навколишнього середовища є особливо актуальними [1]. Шляхи вирішення цих питань різні, але найчастіше для цього використовуються конструктивні рішення [2], гідродинамічні рішення [3], вітрила [4] або сучасні силові установки. Оптимізація руху та економія палива також можливі за рахунок правильного планування маршруту, психологічної підготовки екіпажу, використання систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем з модулями автоматичного керування [5–8]. Функції людини в таких системах зводяться лише до запуску автоматичного модуля та контролю за його роботою, що значно зменшує вплив людського чинника на процеси керування, сприяє зменшенню кількості аварій та катастроф на морі [9]. Останнім часом, для оптимізації процесів керування, використовуються надлишкові керування. Відомі способи використання надлишкового керування в авіаційній промисловості [10], у зварювальному виробництві [11], тощо. Надлишкові керування використовуються також на сучасних судах, наприклад, оснащених динамічною системою позиціонування: судна забезпечення платформ (PSV), судна забезпечення водолазних робіт (DSV), бурові судна, судна для прокладки кабелю та ремонту, судна для прокладки труб, земснаряди, кранові баржі або кранові судна, судна для скидання породи, мобільні морські бурові установки (MODU), човникові танкери, пасажирські, військово-морські судна та інші. До систем керування таких суден пред'являються підвищені вимоги до надійності, точності і маневреності. Для забезпечення цих вимог судна оснащені високоточними засобами вимірювання абсолютного (системи DGPS) і відносного положення, надлишковими структурами активного керування та бортовими обчислювальними потужностями [12, 13]. Наявність надлишкових структур керування дозволяє підвищити не тільки надійність та

маневрові можливості суден, але й оптимізувати процеси керування, зокрема, зменшити витрати палива, збільшити керуючі сили і моменти, зменшити час на виконання операцій.

Об'єктом дослідження є процеси мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишковості керування.

Предметом дослідження є моделі та методи мінімізації енерговитрат, за рахунок використання надлишковості керування.

Постановка проблеми. Для судна з надлишковою структурою керування необхідно знайти оптимальні керування \mathbf{U}^0 , які мінімізують енерговитрати

$$E(\mathbf{U}^0) \rightarrow \min, \quad (1)$$

за умови створення необхідних керуючих сил P_x^* , P_y^* і моменту M_z^* під час виконання операцій (динамічного позиціонування, програмного переміщення, виконання інших маневрів)

$$\begin{cases} P_x(\mathbf{U}^0) = P_x^* \\ P_y(\mathbf{U}^0) = P_y^* \\ M_z(\mathbf{U}^0) = M_z^* \end{cases}, \quad (2)$$

при наявності обмежень на керування

$$\mathbf{U} \leq \mathbf{U}_{\max}. \quad (3)$$

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання оптимізації процесів керування із використанням надлишкових структур раніше розглядалося багатьма авторами. Так, у роботі [14] 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 коефіцієнту струму зміщення в резервній структурі. За допомогою математичного аналізу діапазону зміни коефіцієнту струму зміщення доведено існування оптимального рішення. Розроблено алгоритми пошуку оптимального рішення.

Дослідження системи керування автономним надводним судном, яка б забезпечувала безпечне та точне виконання функціональних завдань за наявності вітру, течії та хвилювання, наведено у дослідженні [15]. 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 [16] 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 коефіцієнту 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 [17]. 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 [18] 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 [19] 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.

У статті [20] 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 [21].

У керівництві [22] 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 гр. 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 посібнику користувача [23] описані три сучасні системи динамічного позиціонування: Navis, Marine Technologies і Rolls Royce, які використовують надлишкові структури для оптимізації процесів керування.

Як видно із проведеного аналізу останніх досліджень та публікацій, методи мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишкового керування, раніше у відкритих джерелах не розглядалися. Тому, розробка таких методів є актуальною науково-технічною задачею.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення енерговитрат на проведення операцій судном з надлишковою структурою виконавчих пристроїв. Поставлена мета досягається за рахунок: вимірювання поточних параметрів руху судна; визначення відхилень вимірюваних параметрів руху від програмних, які повинні забезпечуватися системою керування під час виконання операцій; визначення керуючих сил і моменту в каналах поздовжнього, бокового руху та рискання, необхідних для відпрацювання виявлених відхилень; визначення оптимальних керувань, які забезпечать створення керуючих сил і моменту з мінімальними енерговитратами, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі оптимізаційної задачі з обмеженнями типу рівностей та нерівностей; реалізація оптимальних керувань системою керування.

Основна частина. У загальному випадку, поставлена задача мінімізації енергоспоживання під час виконання операцій зводиться до вирішення у реальному часі оптимізаційної задачі із заданою функцією якості керування (1), нелінійними обмеженнями типу рівностей (2) та лінійними обмеженнями типу нерівностей (3). Функція якості керування (1) являє собою залежність енергоспоживання від параметрів керувань, повинна мати глобальний мінімум або infimum , а також може мати кілька локальних екстремумів та supremum в області допустимих керувань; нелінійні обмеження типу рівностей (2) визначають необхідні керуючі сили та момент, для забезпечення допустимих відхилень від

програмних значень під час виконання операцій, а лінійні обмеження типу нерівностей (3) є обмеженнями на керування. Дана задача може бути вирішена чисельно в бортовому обчислювачі автоматизованої системи із використанням одного із відомих методів умовної оптимізації.

Розглянемо вирішення даної задачі на прикладі офшорного судна з двома кормовими азиподами та носовим підрулюючим пристроєм, рис. 1.

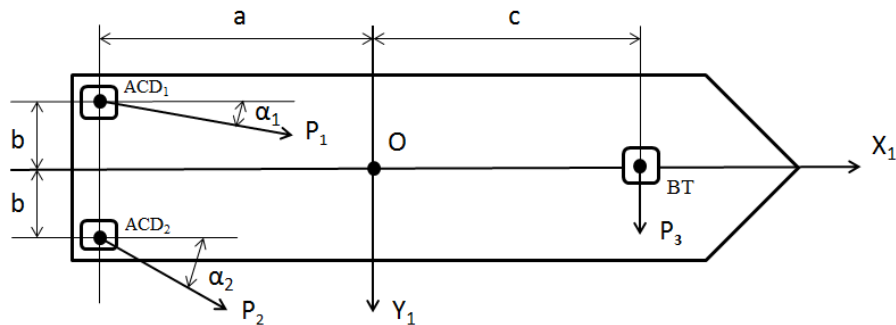


Рисунок 1 – Схема офшорного судна OSV з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм

Початок зв'язаної системи координат (ЗСК) $OX_1Y_1Z_1$ розміщений у центрі обертання O , 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». Надлишкова структура керування включає: перший азипод ACD_1 , положення якого у ЗСК визначається координатами $(-a, -b, 0)$; другий азипод ACD_2 , положення якого у ЗСК визначається координатами $(-a, b, 0)$ та носовий підрулюючий пристрій BT , положення якого у ЗСК визначається координатами $(c, 0, 0)$. Перший азипод ACD_1 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_1 = (P_1 \cos \alpha_1, P_1 \sin \alpha_1, 0)$, де P_1 – модуль сили упору гвинта першого азиподу, α_1 – кут повороту першого азиподу, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_1| \leq P_1^{\max}$, $|\alpha_1| \leq \pi$. Другий азипод ACD_2 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_2 = (P_2 \cos \alpha_2, P_2 \sin \alpha_2, 0)$, де P_2 – модуль сили упору гвинта другого азиподу, α_2 – кут повороту другого азиподу, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_2| \leq P_2^{\max}$, $|\alpha_2| \leq \pi$. Носовий підрулюючий пристрій створює бокову силу $\mathbf{P}_3 = (0, P_3, 0)$, яка обмежена величиною $|\mathbf{P}_3| \leq P_3^{\max}$.

Сумарні сили і момент надлишкової структури, рис. 1, можна записати у вигляді

$$\begin{cases} P_x = P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 \\ P_y = P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + P_3 \\ M_z = P_1 b \cos \alpha_1 - P_2 b \cos \alpha_2 - P_1 a \sin \alpha_1 - P_2 a \sin \alpha_2 + P_3 c \end{cases}, \quad (4)$$

де P_x – сумарна поздовжня керуюча сила структури,

P_y – сумарна бокова керуюча сила структури,

M_z – сумарний керуючий момент структури у каналі рискання.

Значення P_x , P_y , M_z будемо визначати через відхилення вимірних параметрів руху судна від їх програмних значень, необхідних для виконання операцій

$$\begin{cases} P_x = k_1(X_m - X^*) + k_2(V_{xm} - V_x^*) + k_3 \int_0^{\infty} (X_m - X^*) dt \\ P_y = k_4(Y_m - Y^*) + k_5(V_{ym} - V_y^*) + k_6 \int_0^{\infty} (Y_m - Y^*) dt \\ P_z = k_7(\varphi_m - \varphi^*) + k_8(\omega_{zm} - \omega_z^*) + k_9 \int_0^{\infty} (\varphi_m - \varphi^*) dt \end{cases}, \quad (5)$$

де $k_1 - k_9$ – коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора (5), X_m, Y_m, φ_m – вимірні лінійні та кутове положення судна, $V_{xm}, V_{ym}, \omega_{zm}$ – вимірні лінійні швидкості та кутова швидкість ристання, X^*, Y^*, φ^* – програмні положення судна, V_x^*, V_y^*, ω_z^* – програмні швидкості судна.

До складу системи (4) входить п'ять керувань: $P_1, \alpha_1, P_2, \alpha_2, P_3$. Кількість рівнянь системи (4) (кількість ступенів свободи, що підлягають керуванню) – три. Отже, надлишковість керування структури $5-3=2$. Цю надлишковість будемо використовувати для оптимізації енергоспоживання на виконання операцій.

У якості цільової функції будемо використовувати функцію

$$E(P_1, P_2, P_3) = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2, \quad (6)$$

пропорційну потужності виконавчих пристроїв і енерговитратам.

Обмеження на керування структури матимуть вигляд

$$\begin{cases} -P_1^{\max} \leq P_1 \leq P_1^{\max} \\ -\pi \leq \alpha_1 \leq \pi \\ -P_2^{\max} \leq P_2 \leq P_2^{\max} \\ -\pi \leq \alpha_2 \leq \pi \\ -P_3^{\max} \leq P_3 \leq P_3^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

Для оптимізації цільової функції (6) з нелінійними обмеженнями типу рівностей (4) та лінійними обмеженнями типу нерівностей (7) використана функція MATLAB

$$f \min con(@ fun, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{b}_{eq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ nonlcon) \quad (8)$$

де $@ fun$ – посилання на функцію (5), що підлягає оптимізації;

$\mathbf{x0} = (P_1(0), \alpha_1(0), P_2(0), \alpha_2(0), P_3(0))$ – початковий вектор параметрів оптимізації;

\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;

@ *nonlcon* – посилання на файл із системою (4) нелінійних обмежень типу рівностей.

Математичне моделювання процесів динамічного позиціонування з оптимізацією енергоспоживання. Математичне моделювання проводилося в замкнутому контурі «Об’єкт керування – Система керування», створеному в середовищі MATLAB. У якості об’єкту керування використовувалася математична модель судна ESNAAD-224, характеристики якого наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики судна ESNAAD-224

Параметр	Значення
Пропульсивна установка	Два азиподи SCHOTTEL Azimuth Thrusters electrically driven, тип: SRP 1012 R/R, потужність: 1250 КВт, кут повороту 360 градусів.
Гвинт	Фіксованого кроку, діаметр 2100 мм, кількість лопатей: 4.
Система керування	SCHOTTEL Steering System, тип SST 612, потужність: 45 КВт.
Підрулюючі пристрої	Три SCHOTTEL Tunnel thrusters electrically driven, тип: STT 002, потужність: 600 КВт, Швидкість: 1770 об/хв, гвинт фіксованого кроку, діаметр гвинта 1540 мм.
Максимальне водовиміщення	4020 т.
Максимальна швидкість	13 вуз.
Витрати палива	16т/добу @ max. швидкість 13 вуз.
Максимальна осадка	4,85 м.

На рис. 2 наведені результати математичного моделювання у середовищі MATLAB у вигляді графіків зміни у часі параметрів руху судна, керувань і витрат палива для трьох схем: оптимального керування (графіки синього кольору), рівно-векторного керування (графіки зеленого кольору) та рівно-модульного керування з ортогональними векторами (графіки червоного кольору).

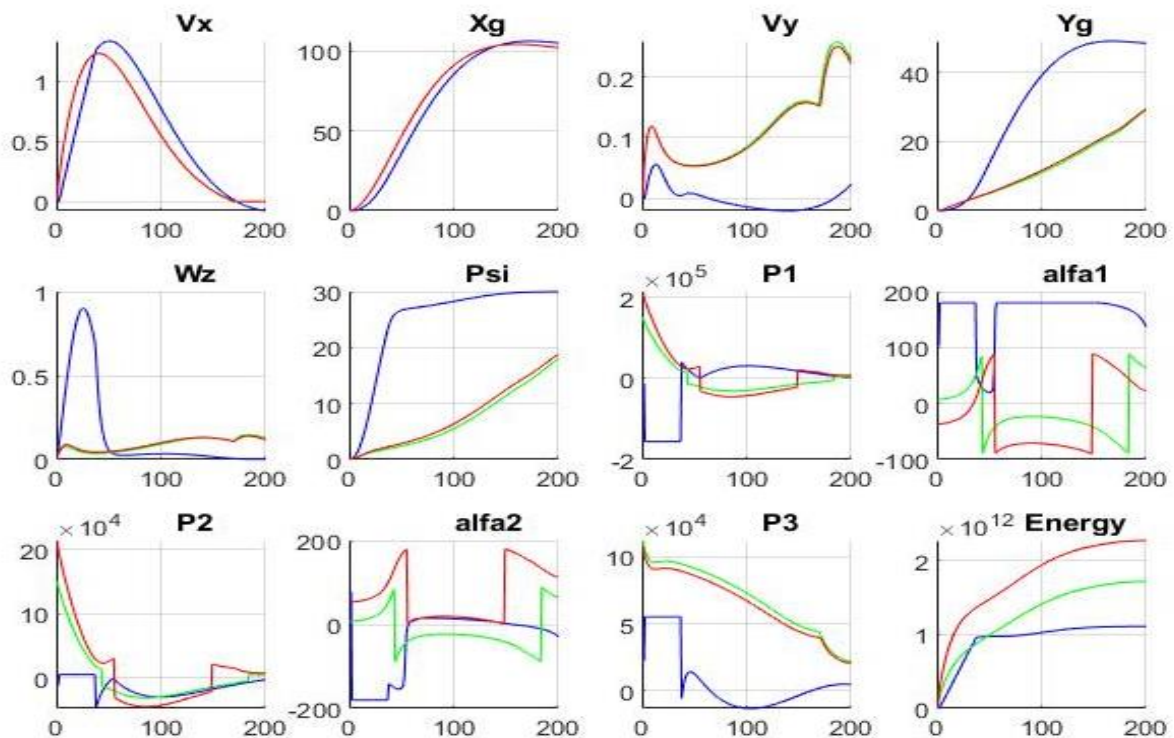


Рисунок 2 – Графіки зміни у часі параметрів руху судна для трьох схем керування

На графіках зображені: поздовжня швидкість судна $V_x[m/c]$, поздовжнє переміщення $X_g[m]$, бокова швидкість $V_y[m/c]$, бокове переміщення $Y_g[m]$, кутова швидкість рискання $\omega_z[gp/c]$, кут рискання (курс) $\phi[gp]$, сила упору гвинта $P_1[n]$ та кут повороту $\alpha_1[gp]$

першого азиподу, сила упору гвинта $P_2[n]$ та кут повороту $\alpha_2[gp]$ другого азиподу, сила упору гвинта носового підрулюючого пристрою $P_3[n]$ та значення цільової функції (6) Energy, пропорційної витратам палива. Початкові значення параметрів руху судна становлять: поздовжня швидкість $V_x(0) = 0 м/с$, поздовжнє переміщення $X_g(0) = 0 м$, бокова швидкість $V_y(0) = 0 м/с$, бокове переміщення $Y_g(0) = 0 м$, кутова швидкість рискання $\omega_z(0) = 0 gp/c$, кут рискання (курс) $\varphi(0) = 0 gp/c$. Як видно із наведених графіків, судно спочатку переміщується в позицію динамічного позиціонування з параметрами: поздовжня швидкість $V_x(t) = 0 м/с$, поздовжнє переміщення $X_g(t) = 100 м$, бокова швидкість $V_y(t) = 0 м/с$, бокове переміщення $Y_g(t) = 50 м$, кутова швидкість рискання $\omega_z(t) = 0 gp/c$, кут рискання (курс) $\varphi(0) = 30 gp/c$ та у подальшому підтримує її. При цьому, як видно з графіку Energy(t), найбільше значення цільової функції для оптимального керування становить $\int_0^t E(t)dt = 1.1e^{12}[н^2с]$, найбільше значення цільової функції для рівно-

векторного керування становить $\int_0^t E(t)dt = 1.7e^{12}[н^2с]$ та найбільше значення цільової функції для рівно-модульного керування з ортогональними векторами становить $\int_0^t E(t)dt = 2.2e^{12}[н^2с]$.

Результати математичного моделювання показують, що оптимальне керування надлишковою структурою з цільовою функцією мінімального енергоспоживання дозволяє знизити енергоспоживання на (35–50)%, у порівнянні з не оптимальними керуваннями.

Основні результати та їх обговорення. Розроблено метод оптимального керування надлишковою структурою виконавчих пристроїв судна, який дозволяє на (35–50)% зменшити енерговитрати на виконання операцій. Отриманий результат пояснюється знаходженням оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі автоматизованої системи оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що використовують надлишкові керування для мінімізації енергоспоживання. Метод розроблений для використання в бортовому обчислювачі автоматизованої системи судна з надлишковими структурами керування і не може використовуватися на суднах, що не мають надлишкового керування, або для ручного керування. Отримані результати є відтворюваними і можуть використовуватися при розробці модулів оптимального керування рухом для мінімізації енергоспоживання. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з використанням інших функцій якості керування та інших надлишкових структур.

Висновки. Проведено аналіз літературних джерел, у яких розглядалися питання оптимального керування, у тому числі із використанням надлишкових структур виконавчих пристроїв. Встановлено, що найближчі технічні рішення реалізовані в системах динамічного позиціонування виробників Navis, Marine Technologies, Rolls Royce, Transas, Consberg. Разом з тим, відомі рішення не дозволяють використовувати надлишкові керування для мінімізації енергоспоживання. Запропоновано метод мінімізації енергоспоживання за рахунок використання надлишковості керування. Метод перевірено на прикладі мінімізації енергоспоживання судна з надлишковою структурою двох кормових азиподів та носового підрулюючого пристрою. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє на (35–50)% зменшити енерговитрати. Отриманий результат пояснюється:

використанням бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення оптимізаційної задачі з обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці методу мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишкового керування. Практичне значення отриманих результатів полягає у перевірці працездатності та ефективності розробленого методу математичним моделюванням та можливістю його використання у бортовому обчислювачі автоматизованої системи керування рухом судна для мінімізації енергоспоживання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vidoza J. A., Andreasen J. G., Haglind F., Reis M., Gallo W., Design and optimization of power hubs for Brazilian off-shore oil production units, *Energy*. 2019, 656–666. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.022.
2. Kai L., Yanyun Y., Yunlong W., Zhenwu H. Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm, *Advances in Engineering Software*. 2018, 250–261. doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.03.011.
3. Feng Y., Chen Z., Dai Yi, Wang F., Cai J., Shen Z. Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model, *Ocean Engineering*. 2018, 145–158. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.062.
4. Ma Y., Bi H., Hu M., Zheng Y., Gan L. Hard sail optimization and energy efficiency enhancement for sail-assisted vessel, *Ocean Engineering*. 2019, 687–699. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.026.
5. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprnov O., Petrovskiy A., Ivanov A., Tymofeiev K. Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
6. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Mateichuk V. M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions // Науковий вісник ХДМА, №2(21), 2019. с. 10–15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.
7. Moiseenko V. S., Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M. Automatic beam control of laser-optical position reference system, Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020, April 2020, Odessa-Istanbul-Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>.
8. Zinchenko S., Tovstokoryi O. What is the pivot point and how to use it to control the vessel, *Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT – 2020)*, May 27–29, 2020, Kherson.
9. Luo M., Shin S. Half-century research developments in maritime accidents: Future directions, *Accident Analysis & Prevention*. 2019, 448–460. doi: 10.1016/j.aap.2016.04.010.
10. 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. doi: 10.4050/JAHS.64.032008.
11. 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. doi: 10.1016/j.rcim.2019.101862.
12. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M., Kuuskoski J. Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels, *Marine Propulsion*. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4956/a88815fe21a86883277042d8cd304a35efc5.pdf>.

13. 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/>.
14. 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. doi: 10.1080/00051144.2020.1806012.
15. 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. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239591.
16. Rigatos G. A nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*, 2022. doi: 10.1080/17445302.2022.2150420.
17. 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. DOI: 10.1007/978-981-19-6613-2_454.
18. Bartels S., Helling S., Meurer T. Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, 2023, pp. 44–49. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.407.
19. 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. doi: 10.1051/cocv/2022065.
20. 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. doi: 10.1109/CACRE50138.2020.9230038.
21. Li W., Shi G. Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms, *Advances in Mechanical Engineering*, 2020. doi: 10.1177/1687814020930455.
22. 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>.
23. Navi – Trainer 5000. Transas offshore simulator. Instructor manual. *Transas MIP Ltd*. 2012. https://cyberonboard.com/wp-content/uploads/NT_5000_5_35_Instructor_Manual_eng.pdf.

REFERENCES

1. Vidoza, J. A., Andreasen, J. G., Haglind, F., Reis, M., Gallo, W. (2019). Design and optimization of power hubs for Brazilian off-shore oil production units, *Energy*, 656–666. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.022.
2. Kai, L., Yanyun, Y., Yunlong, W., Zhenwu, H. (2018). Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm, *Advances in Engineering Software*, 250–261. doi: 10.1016/j.advensoft.2018.03.011.
3. Feng, Y., Chen, Z., Dai, Yi, Wang, F., Cai, J., Shen, Z. (2018). Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model, *Ocean Engineering*, 145–158. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.062.
4. Ma, Y., Bi, H., Hu, M., Zheng, Y., Gan, L. (2019). Hard sail optimization and energy efficiency enhancement for sail-assisted vessel, *Ocean Engineering*, 687–699. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.026.
5. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Saponov, O., Petrovskiy, A., Ivanov, A., Tymofeiev, K. (2022). Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift, *Technology Audit and Production Reserves*, 6(2(68), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.

6. Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Grosheva, O. O., Mateichuk, V. M. (2019). Automatic control of the vessel's movement under external conditions, *Naukovyi Visnyk KSMA*, №2(21), s. 10–15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.
7. Moiseenko, V. S., Zinchenko, S. M., Tovstokoryi, O. M. (2020). Automatic beam control of laser–optical position reference system, *Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020*, April 2020, Odessa-Istanbul-Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JmFqCqYZ1f4SCFMcy6a/view>.
8. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O. (2020). What is the pivot point and how to use it to control the vessel, *Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT – 2020)*, May 27–29, 2020, Kherson
9. Luo, M., Shin, S. (2019). Half-century research developments in maritime accidents: Future directions, *Accident Analysis & Prevention*, 448–460. doi: 10.1016/j.aap.2016.04.010.
10. 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*. doi: 10.4050/JAHS.64.032008.
11. 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*, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101862.
12. 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>.
13. 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/>.
14. 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. doi: 10.1080/00051144.2020.1806012.
15. 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. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239591.
16. Rigatos, G. A. (2022). Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*. doi: 10.1080/17445302.2022.2150420.
17. 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*. DOI: 10.1007/978-981-19-6613-2_454.
18. Bartels, S., Helling, S., Meurer, T. (2023). Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, pp. 44–49. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.407.
19. 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*. doi: 10.1051/cocv/2022065.
20. 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*. doi: 10.1109/CACRE50138.2020.9230038.
21. Li, W., Shi, G. (2020). Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms, *Advances in Mechanical Engineering*. doi: 10.1177/1687814020930455.

22. 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>.

23. Navi – Trainer 5000. Transas offshore simulator. Instructor manual. (2012). Transas MIP Ltd. https://cyberonboard.com/wp-content/uploads/NT_5000_5_35_Instructor_Manual_eng.pdf.

Zinchenko S. M. USING REDUNDANT CONTROL TO MINIMIZE ENERGY CONSUMPTION

Reducing energy consumption in maritime transport, as well as the associated emission reductions and environmental improvements, are particularly relevant. The ways of solving these issues are different, but most often structural solutions, hydrodynamic solutions, sails, or modern power plants are used. Reducing energy consumption can also be achieved due to proper route planning, psychological training of the crew, automation of traffic control processes. The article proposes a method to minimize energy consumption using redundant control. Redundant structures of actuating devices are widely used on modern ships, in particular, on ships with a dynamic positioning system. Traditional purpose of redundant structures is to increase the reliability of the actuating control system and increase the maneuverability of the vessel. The proposed method also uses redundant structures available on ships to minimize fuel consumption. The subject of research are models and methods of optimizing energy consumption, due to the use of redundant control. The aim of the study is to minimize energy consumption for operations. To solve the problem, a systematic approach, analysis and synthesis, imaginary experiment, methods of automatic control theory, numerical methods of conditional optimization, and mathematical modeling were used. The scientific novelty of the obtained results consists in the development of a method for determining optimal controls that minimize energy costs for performing operations by solving optimization problem with constraints in the on-board computer of the automatic or automated control system, unlike known solutions, it uses redundant controls for optimization and allows reducing energy costs by (35–50) %. At the same time, the additional load on the calculation cycle of the on-board computer does not exceed (25–50) ms, which is (2.5–5) % of the total load. The practical value of the obtained results consists in checking the workability and efficiency of the developed method by mathematical modeling and the possibility of its use in the on-board computer of the automated ship motion control system with redundant structures of actuating devices.

Key words: intelligent transport systems; navigation safety; human factor; loss of stability; regular disturbance; restoring moment.

© Зінченко С. М.

Статтю прийнято до редакції 24.06.2024