

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 629.58 : 681.53

О. В. БЛІНЦОВ

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЬ-ТРОСА ПРИ КЕРУВАННІ РУХОМ ПРИВ'ЯЗНОГО ТЕЛЕКЕРОВАНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

На основі аналізу отриманої автором раніше інверсної математичної моделі квазістационарного руху кабель-троса (КТ) підводного комплексу з гнучкими зв'язками встановлено, що застосування коефіцієнтів подібності інверсної моделі КТ дає змогу виразити оптимальну за критерієм мінімізації сили натягу довжину випущеної частини КТ в залежності від масштабованої горизонтальної координати його ходового кінця. Синтезовано аналітичну залежність, яка дає змогу розраховувати оптимальну за критерієм мінімізації сили натягу довжину кабель-троса при керуванні прив'язним телекерованим підводним апаратом.

Ключові слова: підводний комплекс, оптимізація довжини кабель-троса, керування прив'язним підводним апаратом

На основе анализа полученной автором ранее инверсной математической модели квазистационарного движения кабель-троса (КТ) подводного комплекса с гибкими связями установлено, что применение коэффициентов подобия инверсной модели КТ дает возможность выразить оптимальную по критерию минимизации силы натяжения длину выпущенной части КТ в зависимости от масштабированной горизонтальной координаты его ходового конца. Синтезирована аналитическая зависимость, которая позволяет рассчитывать оптимальную по критерию минимизации силы натяжения длину кабель-троса при управлении привязным телеуправляемым подводным аппаратом.

Ключевые слова: подводный комплекс, оптимизация длины кабель-троса, управление привязным подводным аппаратом

A wide range of underwater operations is performed with the use of underwater complexes with flexible tethers (UCFT), which include surface vessels, umbilical cables (UC) and remotely operated underwater vehicles (ROV). The UC has a major disturbing impact on the ROV. Reducing this impact by the UC released part length optimization is a pressing scientific problem.

The UC quasi-stationary motion direct and inverse mathematical models are considered. The UC optimum length is typically determined by an iterative search using the UC inverse model. The equations of the similarity coefficients, which make up the UC inverse model are analyzed. It is found that their application allows expressing the optimum, in terms of tension force minimization, UC released part length, based on the scaled horizontal coordinate of its running end. By approximation and by scaling the UC optimum length iterative search results, the analytical dependence that allows calculating the optimum, in terms of tension force steady-state component minimization, UC length in the ROV control is synthesized. The dependence is implemented by simple computational procedures and can be used in the development of UCFT automatic control systems.

Keywords: underwater complex, umbilical cable length optimization, tethered underwater vehicle control.

Вступ. Підводні комплекси з гнучкими зв'язками (ПКГЗ) утворюють широкий клас підводної техніки і застосовуються для виконання пошукових, інспекційних, науково-дослідних та виробничих задач [1].

Типовий одноланковий ПКГЗ містить телекерований підводний апарат (ТПА), який кабель-тросом (КТ) з'єднано з постом керування (ПК), розташованим на надводному судні забезпечення (СЗ) [2]. Довжина випущеної частини КТ регулюється кабельною лебідкою (КЛ) (рис. 1).

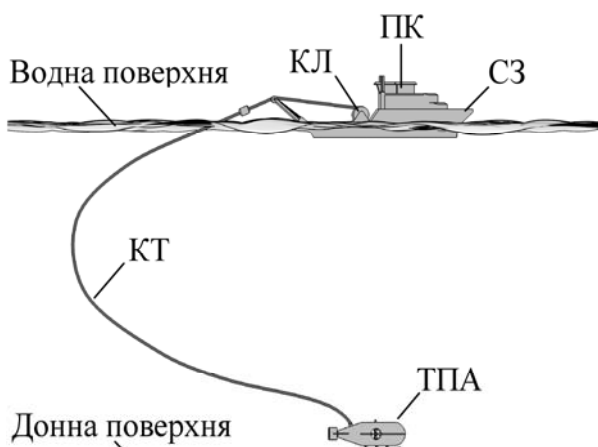


Рис. 1 – Одноланковий підводний комплекс з гнучкими зв'язками

З позиції керування будь-який ПКГЗ складається з двох типів елементів: об'єктів із зосередженими та з розподіленими параметрами [3]. До перших належать морські рухомі об'єкти (МРО) – судна забезпечення та підводні апарати, до других належать гнучкі зв'язки – кабель-троси, кабель-буксири тощо.

Основними режимами роботи одноланкових ПКГЗ є:

- робота ТПА з якорної стоянки СЗ;
- робота ТПА з СЗ, обладнаного засобами динамічного позиціонування;
- робота ТПА з СЗ, що дрейфує;
- узгоджений керований рух ТПА та СЗ.

Для багатоланкових ПКГЗ означені режими характерні для їх ланок. При цьому в ролі СЗ виступає МРО, на якому закріплено корінний кінець гнучкого зв'язку, в ролі ТПА виступає МРО, на якому закріплено ходовий кінець гнучкого зв'язку.

Зазвичай рух елементів ПКГЗ здійснюється в умовах силового гідродинамічного впливу потоку води. При якорній стоянці СЗ цей вплив обумовлено течією, при узгодженому русі елементів ПКГЗ – набігаючим потоком води. Тобто в цілому рух елементів ПКГЗ здійснюється не тільки по відношенню до ґрунту, а також і по відношенню до водної товщі. У зв'язку з цим основний збурюючий вплив на ТПА чинить КТ внаслідок його взаємодії з потоком води. Це суттєво обмежує робочу зону та зменшує швидкість руху ТПА.

© О. В. Блінциов. 2016

Зменшення цього впливу шляхом оптимізації довжини випущеної частини КТ є актуальною науковою задачею. Під квазістаціонарним режимом розуміють режим руху КТ малими прискореннями, коли приєднаними масами води можна знехтувати з-за їх незначної величини у порівнянні з іншими силами гідродинамічної природи [4].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Оптимізація довжини випущеної частини КТ є однією з задач теорії проектування та автоматизації ПКГЗ. Автоматизації елементів ПКГЗ (надводних суден та підводних апаратів) присвячено ряд наукових публікацій.

Систему обходу перешкод та планування траєкторії для безпечного надводного судна запропоновано в [5]. Систему автоматичної стабілізації надводного судна покрововим методом «бекстепінг» запропоновано в [6]. Систему автоматичного керування чотирма ступенями свободи ТПА запропоновано в [7]. Систему високоточного керування глибиною ПА на основі адаптивного нечіткого регулятора в режимі ковзання запропоновано в [8]. Інверсний регулятор одновимірним рухом ТПА запропоновано в [9]. В даних роботах синтезуються САК МРО, проте вплив КТ на їх рух та на роботу САК у цілому не досліджується.

Для моделювання МРО широко застосовуються методи, основані на його представленні як твердого тіла, та методи обчислювальної гідродинаміки [10]. В [11] пропонується симулятор руху судна, в якому враховується його взаємодія з іншими суднами та з ґрунтом при зіткненні. В [12] розроблено симулятор руху судна засобами програмного середовища з відкритим вихідним кодом. Математичну модель руху надводного судна в процесі розвороту представлено в [13]. Робота [14] присвячена дослідженню просторового руху ТПА засобами комп'ютерного моделювання. В [15] розроблено моделюючий комплекс для дослідження нечіткого регулятора ТПА. Проте в даних роботах не враховується збурюючий вплив КТ на МРО.

Відомо про дослідження ПКГЗ з використанням моделі усталеного впливу КТ на ТПА [16]. Також відомо про дослідження окремих рухів ПКГЗ з буксируваними підводними апаратами з використанням спрощених математичних моделей динаміки КТ. В [17] представлено тривимірну модель гідродинаміки підводної буксированої системи. В [18] досліджено круговий горизонтальний маневр буксированої системи.

Дослідження [19] присвячено синтезу САК КЛ, проте в роботі не наводяться відомості про спосіб оптимізації довжини КТ. В [20] розраховується оптимальна довжина КТ нульової плавучості для константної глибини ТПА, при цьому застосовується ітеративний метод пошуку розрахунку.

Опубліковані наукові дослідження, які стосуються ПКГЗ, присвячені в основному синтезу систем автоматичного керування (САК) рухом надводних суден та ТПА, а також розробці математичних моделей ПКГЗ та дослідженню гідродинамічних властивостей МРО. Дослідження в напрямку оптимізації довжини випущеної частини КТ проведено для окремих варіантів кінематичних параметрів елементів ПКГЗ. Відомості про узагальнення отриманих результатів та про можливість їх використання для керованої зміни довжини випущеної час-

тини КТ для мінімізації гідродинамічного впливу на ПКГЗ в науковій літературі не наводяться.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є синтез аналітичної залежності для розрахунку оптимальної довжини випущеної частини кабель-троса нульової плавучості за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу на його ходовому кінці як теоретичної основи для побудови систем автоматичного керування підводними комплексами з гнучкими зв'язками.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні задачі:

– проаналізовано інверсну модель усталеного руху КТ в потоці води;

– синтезовано залежність між координатами ТПА, швидкістю набігаючого потоку води та оптимальною за критерієм мінімізації сили натягу довжиною КТ.

Матеріали та методи оптимізації довжини випущеної частини кабель-троса. Відомо, що мінімум сили гідродинамічного опору КТ забезпечується при його випущеній довжині у 2,5 рази більшій, ніж глибина занурення ТПА [2]. Таке співвідношення справедливе для випадку, коли ТПА знаходиться під СЗ. Для інших конфігурацій ПКГЗ (взаємних розташувань СЗ та ТПА) оптимальна довжина КТ буде відрізнятися від цієї величини.

Задача оптимізації довжини випущеної частини КТ за критерієм мінімізації сили натягу має сенс для квазістаціонарних режимів його руху в потоці води. Це обумовлено тим, що безпосередньо в процесі динамічної зміни довжини КТ, тобто при його випусканні або підбиранні, сили натягу на його кінцях суттєво відрізняються від сил, характерних для квазістаціонарного режиму. Але в динаміці мінімізація усталеної складової сили натягу також дасть змогу зменшити збурюючий вплив КТ на ТПА.

При дослідженні усталених рухів КТ зазвичай приймаються припущення про рівномірний розподіл швидкості набігаючого потоку води по глибини, про циліндричну форму КТ та про гладку поверхню його зовнішньої оболонки КТ. Також приймаються припущення щодо незмінності числа Рейнольдса (відношення сил інерції до сил в'язкості, які виникають в процесі обтікання) для досліджуваного діапазону швидкостей набігаючого потоку води. Такі припущення дають змогу звести задачу пошуку оптимальної довжини КТ до плоскої постановки і застосовувати його відповідну математичну модель [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dL} &= \cos(\alpha); \\ \frac{dy}{dL} &= \sin(\alpha); \\ \frac{d\alpha}{dL} &= \frac{1}{2} \rho C_n D \frac{v|v| \sin(\alpha) |\sin(\alpha)|}{F}; \\ \frac{dF}{dL} &= -\frac{1}{2} \rho C_t D v |v| \cos(\alpha) |\cos(\alpha)|, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x – координата елемента КТ по осі абсцис; L – довжина випущеної частини КТ; α – кут між дотичною до елемента КТ і віссю абсцис; y – координата елемента КТ по осі ординат; ρ – густина води; C_n – коефіціє-

ент нормальної складової гідродинамічного опору КТ; D – діаметр КТ; v – абсолютне значення швидкості набігаючого потоку води; F – модуль сили натягу на елементі КТ; C_t – коефіцієнт тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ.

Для гладких КТ циліндричної форми та для $v=0,1 \dots 3,0$ м/с значення гідродинамічних коефіцієнтів приймають наступними [21]:

$$C_n = 1; C_t = 0,1.$$

Математична модель (1) дає змогу розрахувати координати ходового кінця КТ по відношенню до корінного і представляє собою пряму модель КТ:

$$\vec{r}_{fast} = \vec{f}(\vec{F}_{root}, \vec{v}, L), \quad (2)$$

де \vec{r}_{fast} – радіус вектор, який з'єднує корінний кінець КТ з ходовим, тобто координати ходового кінця КТ, \vec{F}_{root} – вектор сили натягу на корінному кінці КТ, \vec{v} – вектор швидкості набігаючого потоку води.

В задачах моделювання та дослідження елементів ПКГЗ результати розрахунків, а також вхідні дані необхідно подавати по відношенню до ходового кінця КТ. Математичну модель КТ в такій формі нескладно отримати на основі (2), якщо замість \vec{F}_{root} підставити вектор сили натягу на ходовому кінці КТ \vec{F}_{fast} . Тоді в результаті розрахунку будуть отримані координати корінного кінця КТ \vec{r}_{root} по відношенню до ходового, на основі яких шляхом паралельного переносу отримуються координати ходового кінця КТ \vec{r}_{fast} . Інакше кажучи, пряму модель КТ можна представити в змінних, які стосуються лише його ходового кінця:

$$\vec{r}_{fast} = \vec{f}(\vec{F}_{fast}, \vec{v}, L). \quad (3)$$

Для розрахунку гідродинамічного впливу КТ на ТПА потребується інверсна модель КТ:

$$\vec{F}_{fast} = \vec{f}(\vec{r}_{fast}, \vec{v}, L). \quad (4)$$

Координати ходового кінця КТ \vec{r}_{fast} відповідають координатам ТПА, а вектор сили натягу \vec{F}_{fast} є збудуючим для ТПА.

Отримати інверсну модель (4) шляхом аналітичних перетворень, або розв'язку (3) неможливо, оскільки система рівнянь (1) прямої моделі КТ розв'язується чисельними методами. У зв'язку з цим для моделювання (4) застосовуються засоби апроксимації. Ефективним є застосування теорії подібності для інверсного моделювання КТ. Так в [22] автором розроблено інверсну модель усталеного руху КТ на основі коефіцієнтів подібності її параметрів:

$$k_L = \frac{L}{L^*}; \quad (5)$$

$$k_D = \frac{D}{D^*};$$

$$k_C = \frac{C_n}{C_n^*} = \frac{C_t}{C_t^*};$$

$$k_\rho = \frac{\rho}{\rho^*};$$

$$k_v = \frac{v}{v^*};$$

$$k_{sim} = k_L \cdot k_D \cdot k_{Cn} \cdot k_\rho \cdot k_v^2; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{fast}^* &= \frac{x_{fast}}{k_L}; \\ y_{fast}^* &= \frac{y_{fast}}{k_L}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{fast(x)}^* &= k_{sim} F_{fast(x)}^*; \\ F_{fast(y)}^* &= k_{sim} F_{fast(y)}^*; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де $k_L, k_D, k_{Cn}, k_\rho, k_v$ – відповідно, коефіцієнти подібності по довжині КТ, діаметру КТ, коефіцієнтам нормальної або тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ, густині води, швидкості потоку води; k_{sim} – коефіцієнт подібності силових характеристик КТ; $L, D_{cab}, C_n, C_t, \rho, V_f$ – задані параметри математичної моделі КТ; $L^*, D_{cab}^*, C_n^*, C_t^*, \rho^*, v^*$ – базові параметри математичної моделі КТ; x_{fast} та y_{fast} – задані складові вектора \vec{r}_{fast} в плоскій постановці задачі; x_{fast}^* та y_{fast}^* – базові складові базового вектора координат ходового кінця КТ \vec{r}_{fast}^* в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}$ та $F_{fast(y)}$ – шукані складові вектора \vec{F}_{fast} в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ – відомі складові базового вектора сили натягу \vec{F}_{fast}^* в плоскій постановці задачі.

Застосування коефіцієнтів подібності дало змогу апроксимувати інверсну модель КТ, прийнявши більшу частину його параметрів константними, що суттєво знизило її складність:

$$\vec{F}_{fast}^* = \vec{f}(\vec{r}_{fast}^*). \quad (9)$$

Таким чином, на вхід апроксимованої моделі КТ подаються тільки два параметри: x_{fast}^* та y_{fast}^* , які розраховуються за допомоги рівнянь (7). В результаті отримуються апроксимовані значення складових $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ базового вектора сили натягу \vec{F}_{fast}^* , на основі яких за допомоги рівнянь (8) отримуються шукані складові вектора сили натягу \vec{F}_{fast} в плоскій постановці.

Перехід до просторових координат здійснюється із застосуванням рівнянь зв'язку між базовою системою координат (БСК) та кабельною системою координат (КСК). Базова система координат зв'язується з деякою точкою на поверхні землі, також приймається припущення про її інерційність [23]. Початок КСК

співпадає з корінним кінцем КТ, а її орієнтація визначається векторами \vec{r}_{fast} та \vec{v} [24]:

$$\begin{aligned}\hat{i}_c &= \{i_{cx}, i_{cy}, i_{cz}\}_B = \text{ort}(-\vec{v}); \\ \hat{k}_c &= \{k_{cx}, k_{cy}, k_{cz}\}_B = \text{ort}(\vec{r}_{fast} \times \hat{i}_c); \\ \hat{j}_c &= \{j_{cx}, j_{cy}, j_{cz}\}_B = \text{ort}(\hat{k}_c \times \hat{i}_c),\end{aligned}$$

де \hat{i}_c , \hat{j}_c , \hat{k}_c – базові вектори КСК; ort – векторна функція, яка розраховує одиничний вектор; індекс B означає, що координати векторів подано в проекціях на осі БСК.

На початку розрахунку координати вектора \vec{r}_{fast} переводяться в КСК:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{fast} &= \{x_b, y_b, z_b\}_B = \{x_{fast}, y_{fast}, z_{fast}\}_C; \\ \begin{bmatrix} x_{fast} \\ y_{fast} \\ z_{fast} \end{bmatrix} &= A^{-1} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}; \\ A^T &= \begin{bmatrix} i_{cx} & i_{cy} & i_{cz} \\ j_{cx} & j_{cy} & j_{cz} \\ k_{cx} & k_{cy} & k_{cz} \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (10)$$

де A – матриця зв'язку; індекс C означає, що координати векторів подано в проекціях на осі КСК.

Координата z_{fast} завжди дорівнюватиме нулю, оскільки матрицю A сформовано таким чином, що всі елементи КТ будуть знаходитися в площині xOy КСК.

Далі на основі (7)–(9) розраховуються сили $F_{fast(x)}$ та $F_{fast(y)}$. Після цього із застосуванням матриці A вони переводяться в БСК:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} F_{fast(x)} \\ F_{fast(y)} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \vec{F}_{fast} &= \{F_x, F_y, F_z\}_B.\end{aligned}\quad (11)$$

Апроксимована модель КТ, рівняння подібності параметрів моделі КТ та зв'язку між системами координат входять до складу інверсної моделі КТ (4) при розрахунках сил натягу в просторовій постановці задачі.

Оптимальна довжина КТ L_{opt} за критерієм мінімізації сили натягу на його ходовому кінці виконується шляхом пошуку екстремуму

$$|\vec{F}_{fast}(\vec{r}_{fast}, \vec{v}, L)| \rightarrow \min, L \in [|\vec{r}_{fast}|, \infty).$$

Оскільки інверсна модель КТ (4) задана не в аналітичному виді, то пошук екстремуму необхідно здійснювати ітеративно. Відомо, що випускання КТ поступово зменшує силу натягу до певного значення, після чого сила натягу починає збільшуватись [20]. У зв'язку з цим для визначення L_{opt} застосовується метод лінійного перебору L . Також відомо, що при зміні L в межах $\pm 0,05L$ сила натягу змінюється не більше,

ніж на 1%. це дає змогу обирати ΔL в залежності від поточного значення L . Починаючи від $L = |\vec{r}_{fast}|$, величину L потрібно покроково збільшувати на величину приросту ΔL до початку зростання $|\vec{F}_{fast}|$. Величина L на початку зростання $|\vec{F}_{fast}|$ і є шуканою L_{opt} (рис. 2).

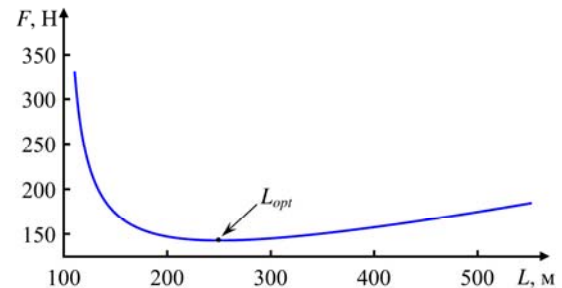


Рис. 2 – Залежність сили натягу F на ходовому кінці кабельтроса від довжини його випущеної частини L

Для виключення необхідності ітеративного способу розрахунку L_{opt} пропонується розрахувати L_{opt} для необхідних параметрів математичної моделі КТ та апроксимувати отримані значення. Застосування коефіцієнтів подібності та рівнянь зв'язку між плоскими (КСК) та просторовими (БСК) координатами дає змогу розраховувати базове значення оптимальної довжини КТ L_{opt}^* в залежності тільки від двох параметрів:

x_{fast}^* та y_{fast}^* . Таким чином, оптимальна довжина КТ залежить тільки від взаємного відносного розташування ходового та корінного кінців, якщо їх розташування розглядається в КСК, і не залежить від його діаметру, швидкості потоку води та інших параметрів моделі.

Аналіз коефіцієнтів подібності (5), (7) показує, що в цілому результати розрахунку $L_{opt}(x_{fast}, y_{fast})$ можна масштабувати по координаті y . Так, наприклад, якщо $L_{opt}(10, -100) = 255$ м, то для $x_{fast} = 1$ м та $y_{fast} = -10$ м в результаті застосування рівнянь подібності отримаємо $L_{opt}(1, -10) = 25,5$ м.

Таким чином, параметр y_{fast} можна прийняти рівним -1 та сформувати вибірку масштабованих значень оптимальної довжини КТ L_{opt}^s в залежності від масштабованої горизонтальної координати ходового кінця КТ x_{fast}^s :

$$L_{opt}^s = f(x_{fast}^s). \quad (12)$$

При відомій залежності (12) розрахунок L_{opt} буде виконуватись в такій послідовності:

1) завдання вхідних даних: координат ходового кінця КТ по відношенню до корінного у вигляді вектору $\vec{r}_{fast} = \{x_b, y_b, z_b\}_B$, а також вектору швидкості навігаючого потоку води \vec{v} (або його орту);

2) розрахунок координат $\vec{r}_{fast} = \{x_{fast}, y_{fast}, z_{fast}\}_C$ за допомогою рівняння (10);

3) визначення коефіцієнту масштабування k_s через координату y_{fast} на основі першого рівняння системи (7):

$$k_s = \frac{y_{fast}}{y_{fast}^s};$$

при цьому, враховуючи, що $y_{fast}^s = -1$ м, отримаємо

$$k_s = -y_{fast}; \tag{13}$$

4) розрахунок масштабованого значення горизонтальної координати ходового кінця КТ x_{fast}^s на основі другого рівняння системи (7):

$$x_{fast}^s = \frac{x_{fast}}{k_s}; \tag{14}$$

5) розрахунок масштабованого значення оптимальної довжини КТ L_{opt}^s на основі залежності (12);

6) розрахунок оптимальної довжини випущеної частини КТ L_{opt} на основі рівняння (5):

$$L_{opt} = k_s L_{opt}^s. \tag{15}$$

Об'єднавши співвідношення (10), (12)–(15) в єдиний алгоритм отримаємо залежність для L_{opt} наступного виду:

$$L_{opt} = f(\vec{r}_{fast}, \vec{v}).$$

Отримаємо залежність для масштабованого значення оптимальної довжини КТ (12). Для цього здійснимо пошук оптимальних масштабованих довжин КТ ітеративним способом. Результати наведено на рис. 3.

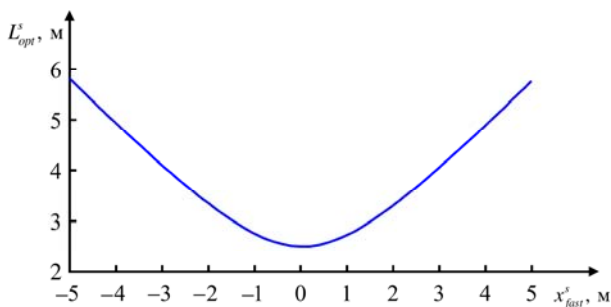


Рис. 3 – Залежність масштабованого значення довжини кабель-троса від масштабованого значення горизонтальної координати його ходового кінця

Аналіз отриманих результатів показує, що, поперше, отримана залежність симетрична відносно осі абсцис, по-друге її форма до $x_{fast}^s = 3$ м схожа на параболу, а далі L_{opt}^s збільшується майже лінійно. У зв'язку з цим залежність (12) пропонується апроксимувати наступним рівнянням:

$$L_{opt}^s = \begin{cases} a_0 + a_1 |x_{fast}^s| + a_2 (x_{fast}^s)^2, & \text{if } |x_{fast}^s| < b_0; \\ \frac{b_0}{|x_{fast}^s|} + b_1 |x_{fast}^s|, & \text{else,} \end{cases} \tag{16}$$

де $a_{0,1,2}$ та $b_{0,1}$ – константні коефіцієнти.

Друге рівняння системи містить пропорційну та показникову складові. Вибір такої форми другого рівняння обумовлено тим, що в цілому при зростанні x_{fast}^s лінійно зростає і L_{opt}^s . Але при відносно невеликих значеннях x_{fast}^s недостатньо лише пропорційної складової. На основі аналізу графіку, представленого рис. 3 було обрано такі коефіцієнти $b_{0,1}$:

$$b_0 = 3,0, b_1 = 1,015.$$

Коефіцієнти $a_{0,1,2}$ було визначено методом найменших квадратів:

$$a_0 = 2,4689, a_1 = 0,1461, a_2 = 0,1306.$$

В цілому вираз (16) апроксимує залежність (12) з точністю до $\pm 0,02L$, цього цілком достатньо для визначення оптимальної довжини КТ.

Обговорення результатів синтезу залежності для оптимізації довжини випущеної частини кабель-троса. Рівняння (16) дає змогу розраховувати оптимальну за критерієм мінімізації сили гідродинамічного опору довжину КТ в залежності від поточних координат ТПА та напрямку набігаючого потоку води. Застосування коефіцієнтів подібності параметрів математичної моделі КТ дало змогу сформулювати вибірку для оптимальних довжин КТ в залежності від одного параметру – горизонтальної (по відношенню до КСК) координати ходового кінця КТ. Це суттєво спростило кінцевий вид отриманого рівняння і дало змогу застосувати прості поліноміальні залежності при апроксимації отриманих вибірок.

Але слід зазначити, що отриманий результат буде справедливим лише для КТ нульової плавучості. При ненульовій плавучості з'являються додаткові сили, які в сукупності з гідродинамічними силами змінюють конфігурацію КТ в просторі. Як наслідок оптимальна довжина буде відрізнятися від отриманої за рівняннями (16). Також має виконуватись умова гладкості зовнішньої поверхні КТ. Якщо поверхня КТ має витий характер, то на ньому виникатимуть не тільки дотичні та нормальні, а також і бокові гідродинамічні сили. Як наслідок, його конфігурацію в просторі не можна буде розрахувати шляхом приведення до плоскої постановки задачі.

Отриманий результат може бути покладений в основу створення систем автоматичного керування ПКГЗ, в яких застосовуються КТ нульової плавучості.

Висновки

1. Проаналізовано інверсну модель квазістаціонарного руху кабель-троса підводного комплексу з гнучкими зв'язками в потоці води як об'єкта керування. Встановлено, що рівняння для визначення коефіцієнтів подібності параметрів інверсної моделі можуть бути використані у складі аналітичної залежності для розрахунку оптимальної за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу довжини кабель-троса.

2. Методом апроксимації та шляхом масштабування результатів ітеративного пошуку оптимальних довжин кабель-троса одноланкового підводного ком-

плексу з гнучкими зв'язками синтезовано аналітичну залежність, яка дає змогу розрахувати оптимальну за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу довжину кабель-троса в залежності від його координат та напрямку набігаючого потоку води та яка реалізується простими обчислювальними процедурами. Отримана залежність є теоретичним узагальненням процесу керування силовим гідродинамічним впливом кабель-троса на телекерований підводний апарат і може бути використана у складі систем автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками.

Список літератури:

1. Antonelli, G. Underwater Robots [Text] / G. Antonelli. – Springer Tracts in Advanced Robotics. – 2014. – 279 p. doi: [10.1007/978-3-319-02877-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02877-4)
2. Блинецов, В. С. Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинецов, В. Э. Магула. – Киев: Наукова думка, 1997. – 140 с.
3. Dudykevych, V. Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers [Text] / V. Dudykevych, O. Blintsov // Eureka: Physics and Engineering. – 2016. – № 5. – P. 25–36. doi: [10.21303/2461-4262.2016.00158](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158)
4. Александров, М. Н. Судовые устройства [Текст]: справ. / М. Н. Александров. – Ленинград: Судостроение, 1987. – 656 с.
5. Soltan, R. A. ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels [Text] / R. A. Soltan, H. Ashrafioun, K. R. Muske // Robotica. – 2010. – № 29 (5). – P. 691–703. doi: [10.1017/s0263574710000585](https://doi.org/10.1017/s0263574710000585)
6. Do, K. D. Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships [Text] / K. D. Do // Journal of Marine Science and Application. – 2011. – № 10 (3). – P. 325–332. doi: [10.1007/s11804-011-1076-z](https://doi.org/10.1007/s11804-011-1076-z)
7. García-Valdovinos, L. G. Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle [Text] / L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernández-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2014. – № 11 (1). – P. 1–16. doi: [10.5772/56810](https://doi.org/10.5772/56810)
8. Bessa, W. M. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller [Text] / W. M. Bessa, M. S. Dutra, E. Kreuzer // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – № 56. – P. 670–677. doi: [10.1016/j.robot.2007.11.004](https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004)
9. Blintsov, O. Formation of a reference model for the method of inverse dynamics in the tasks of control of underwater complexes [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/2 (82). – P. 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.74875](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74875)
10. Stern, F. Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward [Text] / F. Stern, J. Yang, Z. Wang, H. Sadat-Hosseini, M. Mousaviraad, S. Bhushan, T. Xing // International Shipbuilding Progress. – 2013. – Vol. 60, Issue 1–4. – P. 3–105.
11. Yu, Zh. Full six degrees of freedom coupled dynamic simulation of ship collision and grounding accidents [Text] / Zh. Yu, J. Amdahl // Marine Structures. – 2016. – № 47. – P. 1–22. doi: [10.1016/j.marstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.03.001)
12. Del Puppo, N. High resolution ship hydrodynamics simulations in open source environment [Text] / N. Del Puppo // Journal of Marine Science and Application. – 2014. – Vol. 13, Issue 4. – P. 377–387. doi: [10.1007/s11804-014-1278-2](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1278-2)
13. Kalinichenko, Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning [Text] / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 6/9 (84). – P. 20–31. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85839](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839)
14. Deng, W. Study on Simulation of Remotely Operated Underwater Vehicle Spatial Motion [Text] / W. Deng, D. Han // Journal of Marine Science and Application. – 2013. – Vol. 12, Issue 4. – P. 445–451. doi: [10.1007/s11804-013-1215-9](https://doi.org/10.1007/s11804-013-1215-9)
15. Thekkedan, M. D. Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning [Text] / M. D. Thekkedan, C. S. Chin, W. L. Woo // Journal of Marine Science and Application. – 2015. – № 14 (1). – P. 14–24. doi: [10.1007/s11804-015-1297-7](https://doi.org/10.1007/s11804-015-1297-7)
16. Fang, M. C. On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect [Text] / M. C. Fang, C. S. Hou, J. H. Luo // Ocean Engineering. – 2007. – Vol. 34, Issues 8–9. – P. 1275–1289. doi: [10.1016/j.oceaneng.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.014)
17. Srivastava, V. K. Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable [Text] / V. K. Srivastava // Journal of Marine Science and Application. – 2014. – Vol. 13, Issue 2. – P. 185–192. doi: [10.1007/s11804-014-1240-3](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1240-3)
18. Yang, J. X. The dynamic research and position estimation of the towed array during the U-turn process [Text] / J. X. Yang, C. G. Shuai, L. He, S. K. Zhang, S. T. Zhou // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 744 (012068). – P. 1–7. doi: [10.1088/1742-6596/744/1/012068](https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012068)
19. Павлов, Г. В. Синтез системи автоматичного керування ледікою кабель-троса самохідної прив'язної підводної системи [Текст] / Г. В. Павлов, О. В. Блинецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 4 (51). – С. 97–99.
20. Блинецов, О. В. Система автоматичного керування кабельною ледікою прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блинецов, В. А. Надточій // Збірник наукових праць НУК. Електротехніка. – 2013. – № 1. – С. 77–82.
21. Войткунський, Я. И. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители [Текст] / Я. И. Войткунський, А. А. Русецкий. – Ленинград: Судостроение, 1985. – 763 с.
22. Блинецов, О. В. Автоматизация керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі [Текст] / Блинецов О. В. // Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – № 7. – С. 54–57.
23. Лукомский, Ю. А. Навигация и управление движением судов. Учебник. [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – Элмор, 2002. – 360 с.
24. Блинецов, О. В. Синтез системи автоматичного керування упорами рушіїв прив'язного підводного апарата в режимі квазістаціонарного просторового руху [Текст] / О. В. Блинецов // Збірник наукових праць НУК. – 2008. – № 1 (418). – С. 135–141.

Bibliography (transliterated):

1. Antonelli, G. (2014). Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, 279. doi: [10.1007/978-3-319-02877-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02877-4)
2. Blintsov, V. S., Magula, V. E. (1997). Proektirovanie samohodnykh privyaznykh podvodnykh sistem. Kyiv: Naukova dumka, 140.
3. Dudykevych, V., Oleksandr, B. (2016). Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. Eureka: Physics and Engineering, 5, 25–36. doi: [10.21303/2461-4262.2016.00158](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158)
4. Aleksandrov, M. N. (1987). Sudovye ustrojstva. Leningrad: Sudostroenie, 656.
5. Soltan, R. A., Ashrafioun, H., Muske, K. R. (2010). ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels. Robotica, 29 (05), 691–703. doi: [10.1017/s0263574710000585](https://doi.org/10.1017/s0263574710000585)
6. Do, K. D. (2011). Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships. Journal of Marine Science and Application, 10 (3), 325–332. doi: [10.1007/s11804-011-1076-z](https://doi.org/10.1007/s11804-011-1076-z)
7. García-Valdovinos, L. G., Salgado-Jiménez, T., Bandala-Sánchez, M., Nava-Balanzar, L., Hernández-Alvarado, R., Cruz-Ledesma, J. A. (2014). Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle. International Journal of Advanced Robotic Systems, 11 (1), 1–16. doi: [10.5772/56810](https://doi.org/10.5772/56810)
8. Bessa, W. M., Dutra, M. S., Kreuzer, E. (2008). Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller. Robotics and Autonomous Systems, 56, 670–677. doi: [10.1016/j.robot.2007.11.004](https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004)
9. Blintsov, O. (2016). Formation of a reference model for the method of inverse dynamics in the tasks of control of underwater complexes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/2 (82), 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.74875](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74875)
10. Stern, F., Yang, J., Wang, Z., Sadat-Hosseini, H., Mousaviraad, M., Bhushan, S., Xing, T. (2013). Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward. International Shipbuilding Progress, 60 (1–4), 3–105.
11. Yu, Zh., Amdahl, J. (2016). Full six degrees of freedom coupled dynamic simulation of ship collision and grounding accidents. Marine Structures, 47, 1–22. doi: [10.1016/j.marstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.03.001)

12. Del Puppo, N. (2014). High resolution ship hydrodynamics simulations in open source environment. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (4), 377–387. doi: [10.1007/s11804-014-1278-2](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1278-2)
13. Kalinichenko, Y., Burmaka, I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9(84)), 20–31. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85839](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839)
14. Deng, W., Han, D. (2013). Study on simulation of remotely operated underwater vehicle spatial motion. *Journal of Marine Science and Application*, 12 (4), 445–451. doi: [10.1007/s11804-013-1215-9](https://doi.org/10.1007/s11804-013-1215-9)
15. Thekkedan, M. D., Chin, C. S., Woo, W. L. (2015). Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Application*, 14 (1), 14–24. doi: [10.1007/s11804-015-1297-7](https://doi.org/10.1007/s11804-015-1297-7)
16. Fang, M. C., Hou, C. S., Luo, J. H. (2007). On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect. *Ocean Engineering*, 34 (8–9), 1275–1289. doi: [10.1016/j.oceaneng.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.014)
17. Srivastava, V. K. (2014). Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (2), 185–192. doi: [10.1007/s11804-014-1240-3](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1240-3)
18. Yang, J. X., Shuai, C. G., He, L., Zhang, S. K., Zhou, S. T. (2016). The dynamic research and position estimation of the towed array during the U-turn process. *Journal of Physics: Conference Series*, 744 (012068), 1–7. doi: [10.1088/1742-6596/744/1/012068](https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012068)
19. Pavlov, G. V., Blinczov, O. V. (2008). Sy`ntez sy`stemy` avtomaty`chnogo keruvannya lebidkoyu kabel`-troasa samoxidnoyi pry`v'язnoyi pidvodnoyi sy`stemy. *Visnyk Kremenchucz`kogo derzhavnogo politexnichnogo universy`tetu imeni My`xajla Ostrograds`kogo*, 4 (51), 97–99.
20. Blinczov, O. V., Nadtochij, V. A. (2013). Sy`stema avtomaty`chnogo keruvannya kabel`noyu lebidkoyu pry`v'язnoyi pidvodnoyi sy`stemy. *Zbirnyk naukovy`x prac` NUK. Elektrotehnika*, 1, 77–82.
21. Vojtkunskij, Ya. Y., Ruseczkyj, A. A. (1985). *Gydromexanyka. Soproty`vleny`e dvy`zheny`yu sudov. Sudovye dvizhiteli*. Leningrad: Sudostroenye, 763.
22. Blinczov, O. V. (2008). Avtomaty`zacija keruvannya elektrorushijnoyu sy`stemoju pry`v'язnogo pidvodnogo robota na osnovi shtuchnoyi nejronnoyi mrezihi. *Problemy` suchasnoyi elektrotehniky*, 7, 54–57.
23. Lukomskij, Ju. A., Peshehonov, V. G., Skorohodov, D. A. (2002). *Navigacija i upravlenie dvizheniem sudov*. Uchebnik. Jelmor, 360.
24. Blinczov, O. V. (2008). Sy`ntez sy`stemy` avtomaty`chnogo keruvannya uporamy` rushiyiv pry`v'язnogo pidvodnogo aparata v rezhy`mi kvazistacionarnogo prostorovogo ruxu. *Zbirnyk naukovy`x prac` NUK*, 1 (418), 135–141.

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата/ О. В. Блінцов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.18–24. – Бібліогр.: 24 назв. – ISSN 2079-5459.

Оптимизация длины кабель-троса при управлении движением привязного телеуправляемого подводного аппарата/ А. В. Блинцов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.18–24. – Бібліогр.: 24 назв. – ISSN 2079-5459.

Umbilical cable length optimization at tethered remotely operated vehicle motion control/ О. Blintsov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.18–24. – Bibliogr.: 24. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Блінцов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», докторант кафедри захисту інформації; вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net

Блинцов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника», докторант кафедры защиты информации; ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net

Blintsov Oleksandr – candidate of technical sciences, associate professor, Lviv Polytechnic National University; Doctoral candidate, Department of Information Security; S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net