

УДК 621.314
Б 69

ВИЗНАЧЕННЯ УПОРІВ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИВ'ЯЗНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА-РОБОТА

В. С. Блінцов, проф., д-р техн. наук¹
О. М. Киризюк, капітан I рангу²

¹Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв
²Міністерство оборони України, м. Київ

Анотація. Розроблено узагальнену методику проектного розрахунку упорів електрорушійного комплексу прив'язного підводного апарата-робота, яка використовує математичну модель підводного апарата й інверсну нейромережну модель кабель-троса.

Ключові слова: підводний апарат-робот, електрорушійний комплекс, упори рушіїв, математичне моделювання, інверсна нейромережна модель.

Аннотация. Разработана обобщенная методика проектного расчета упоров электродвигательного комплекса привязного подводного аппарата-робота, которая использует математическую модель подводного аппарата и инверсную нейросетевую модель кабель-троса.

Ключевые слова: подводный аппарат-робот, электродвигательный комплекс, упоры двигателей, математическое моделирование, инверсная нейросетевая модель.

Abstract. The generalized methodology of design calculation of hydrodynamic forces of the thrusters of the tethered underwater robot was developed. The methodology includes the mathematical model of the underwater robot and the inverse neural network model of the tether-cable.

Keywords: submarine robot device, electromotive system, engine props, mathematical modeling, inverse connectionist model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Прив'язні підводні апарати-роботи (ПАР) є ефективним засобом морської техніки для розв'язання широкого кола підводно-технічних задач цивільного і військового призначення [1, 8]. Зазвичай до складу типового ПАР входять пост енергетики і керування роботом (ПЕК), кабельна лебідка (КЛ) з кабель-тросом (КТ) та телекерований самохідний підводний апарат (ПА), який виконує пошук й обстеження підводних об'єктів, а також технічні підводні роботи із застосуванням гідроакустики, систем технічного зору, маніпуляторів тощо [6]. Базується ПАР на спеціальному судні-носії (СН), яке транспортує його до робочої аквато-

рії та забезпечує спуско-піднімальні операції бортовими вантажопіднімальними засобами.

Електрорушійний комплекс (ЕРК) є одним з основних технічних засобів ПАР, який забезпечує доставку ПА у задану підводну робочу зону, його просторовий рух та позиціонування у цій зоні в умовах дії зовнішніх збурень [9]. Науково обгрунтована оцінка упорів ЕРК дає можливість правильно сформулювати технічне завдання на створення ПАР і прийняти проектні рішення щодо визначення архітектурно-конструктивного типу ПА та вибору його рушіїв, що підвищує достовірність проектних розрахунків і скорочує цикл створення ПАР у цілому.

Складність визначення упорів ЕРК ПАР обумовлена істотно нелінійними залежностями гідродинамічного опору ПА та його КТ при русі у потоці води й широким діапазоном вимог до експлуатаційних характеристик: робочими глибинами, дистанціями до СН, швидкостями течії тощо. Досвід проектування ПАР показує, що головним чинником при цьому є гідродинамічний опір КТ, який має долати ЕРК (до 90 % гідродинамічного опору системи «КТ–ПА»).

На цей час у проектній практиці знайшли застосування наближені методики оцінки упорів ЕРК, які ґрунтуються на спрощених уявленнях про просторову форму й силові характеристики КТ у потоці води [5], та методики на базі уточнених моделей КТ, що вимагають проведення масових комп'ютерних розрахунків [1]. Подальшим розвитком останніх є комп'ютерне моделювання функціонування ПАР на основі достовірних моделей його елементів, що утворює ефективний інструмент дослідження властивостей апарата-робота в різних умовах експлуатації і дає змогу вже на ранніх етапах проектування визначати вимоги до технічних характеристик створюваного ПАР у залежності від його призначення. Наведений у роботі [3] підхід до моделювання КТ із застосуванням елементів штучного інтелекту дає можливість спростити процедуру й підвищити достовірність попередньої оцінки упорів ЕРК на етапах формулювання технічного завдання та ескізного проектування ПАР.

МЕТА РОБОТИ — розробка узагальненої методики проектного розрахунку упорів електрорушійного комплексу прив'язного підводного апарата-робота на основі застосування математичних та нейромережних моделей елементів робота.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Визначення упорів ЕРК ПАР розглядаємо для одного з найбільш складних та енергоємних режимів роботи — горизонтального усталеного руху системи «СН–КТ–ПА» з максимальною проектною швидкістю v_{\max} , коли ПА знаходиться на максимальній проектній глибині Y_3 і дистанції X_3 до СН. Як

базовий обираємо випадок плоскої задачі, коли КТ і ПА знаходяться у діаметральній площині СН. Для просторового варіанта системи «СН–КТ–ПА», який є більш загальним і розглядає робочу зону ПА на донній поверхні, перерахунок координат та сил елементів системи виконуємо за відношеннями, описаними в [4]. Для математичного опису силової взаємодії елементів ПАР будемо використовувати напівзв'язану просторову систему координат [7].

Дослідження особливостей квазістаціонарного горизонтального руху системи «СН–КТ–ПА» показали, що, на відміну від горизонтальної складової сили опору корпусу ПА R_x , вектор сили натягу КТ $\vec{T} = \{T_x, T_y, T_z\}$ суттєво залежить від поточного розташування його ходового кінця (координат ПА $\{x, y, z\}$) відносно СН, а максимальна сила натягу КТ по кожній осі — від розмірів заданої робочої зони ПА. Істотно нелінійні властивості ПАР як керованого морського рухомого об'єкта та наявність невизначеностей його власних параметрів і характеристик зовнішнього середовища обумовлюють необхідність широкого застосування методів комп'ютерного моделювання як інструментальної основи для створення узагальненої інженерної методики проектного розрахунку упорів ЕРК ПА. Узагальнена структура обчислення упорів ЕРК за такою методикою показана на рис. 1.

На рис. 1 позначено $\vec{F}_{ЕРК} = \{F_x, F_y, F_z\}$ — вектор сили, який повинен розвивати ЕРК у режимі синхронного квазістаціонарного руху ПА і СН, коли виконується умова

$$\vec{F}_{ЕРК} = \vec{T}, \quad (1)$$

де F_x, F_y, F_z — упори рушіїв маршового, вертикального й бокового руху по осях x, y, z симетрії ПА.

При цьому складові векторів $\vec{F}_{ЕРК}$ і \vec{T} зв'язані відомими відношеннями

$$F_x = T_x + R_x; F_y = T_y; F_z = T_z. \quad (2)$$

На практиці при просторовому русі ПА завжди зорієнтований носом проти набігаючого потоку води, тому в обчислювачі (див. рис. 1) сили гідродинамічного опору корпусу ПА використовуємо відому залежність

$$R_x = 0,5C_x\rho S_{ПА}v_x^2, \quad (3)$$

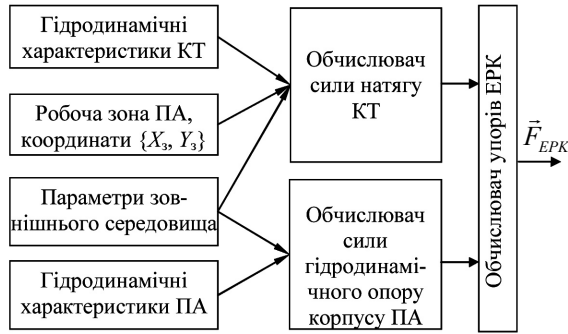


Рис. 1. Узагальнена структура обчислення упорів електрорушійного комплексу

де C_x — гідродинамічний коефіцієнт лобового опору ПА (гідродинамічна характеристика ПА); $S_{ПА}$ — характерний розмір корпусу ПА (гідродинамічна характеристика ПА); ρ — питома густина води (параметр зовнішнього середовища); v_x — задана максимальна швидкість горизонтального руху ПА відносно води (параметр зовнішнього середовища).

Роботу обчислювача сили натягу КТ пропонується організувати таким чином: задати робочу зону ПА у вигляді масиву МПА, кожний i -й елемент якого представляє собою вектор координат ходового кінця КТ (координат місця ПА над донною поверхнею) відносно СН, і при незмінних гідродинамічних

характеристиках КТ та параметрах зовнішнього середовища комп'ютерним перебором визначити максимально можливі значення складових вектора сили натягу КТ. Для роботи такого обчислювача необхідно використовувати достовірну модель КТ.

У роботі КТ моделюється абсолютно гнучкою ниткою з нульовою плавучістю, яка має форму круга в перерізі й рухається відносно водної товщі у горизонтальному напрямку в квазістаціонарному режимі. При русі в потоці води на такому КТ виникають сили гідродинамічного опору, розрахунок яких виконується методом дугової апроксимації [2]. В основі методу лежить система диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dx}{dl} = \cos(\alpha); \\ \frac{dy}{dl} = \sin(\alpha); \\ \frac{d\alpha}{dl} = \frac{1}{2} \rho C_n d_{КТ} \frac{v_x |v_x| \cdot |\sin(\alpha)| \cdot \sin(\alpha)}{T}; \\ \frac{dT}{dl} = -\frac{1}{2} \rho C_t d_{КТ} v_x |v_x| \cdot |\cos(\alpha)| \cdot \cos(\alpha), \end{cases} \quad (4)$$

де x, y — відповідно координати i -го одиничного елемента КТ по осях абсцис і ординат (горизонтальній та вертикальній осях напівв'язаної системи координат); l — довжина i -го одиничного елемента попущеної частини КТ; α — кут між дотичною до i -го елемента КТ і віссю абсцис; C_n, C_t — відповідно коефіцієнти нормальної та дотичної складових гідродинамічного опору КТ; $d_{КТ}$ — діаметр КТ; v_x — абсолютне значення

швидкості потоку води (течії) відносно КТ; T — модуль сили натягу на i -му елементі КТ.

Система рівнянь (4) являє собою пряму математичну модель КТ, яка дає змогу виконувати розрахунок координат його ходового кінця в плоскій постановці в залежності від вектора сили натягу на корінному кінці \vec{T}_0 .

Його складові в такій моделі задаються полярними координатами $\vec{T}_0 = \{T_0, \alpha_0\}$, де

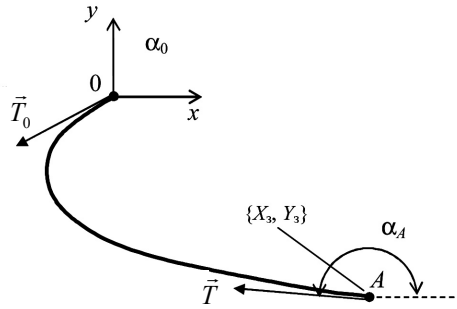


Рис. 2. Сили гідродинамічного опору кабель-троса у площині

T_0 — модуль вектора сили натягу КТ на корінному кінці; α_0 — кут між дотичною до корінного елемента КТ та віссю абсцис плоскої системи координат (рис. 2).

У результаті розрахунку крім заданих координат ходового кінця КТ $\{X_3, Y_3\}$ також отримуємо полярні координати вектора сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{T}_A = \{T_A, \alpha_A\}$.

Як впливає з постановки задачі, для визначення упорів ЕРК необхідно розв’язувати зворотню задачу в просторовій постановці: розраховувати вектор сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{T}_A = \{T_{Ax}, T_{Ay}, T_{Az}\}$ у залежності від координат ПА над донною поверхнею, тобто виконувати інверсне моделювання КТ у просторовій постановці. Таку задачу розв’язано засобами штучного інтелекту в роботі [3] для задач автоматичного керування просторовим рухом ПА. Інверсна нейромережна модель (ІНМ) КТ містить у собі два прихованих шари по 20 нейронів у кожному і дає змогу з достатньою точністю виконувати розрахунки на 2–3 порядки швидше, ніж при інверсному математичному моделюванні шляхом підбору початкових змінних. З позицій користувача ІНМ КТ представляє собою спеціальну комп’ютерну програму-апроксиматор, що заздалегідь «натренована» (термін — з теорії штучних нейронних мереж) на оперативну генерацію числових значень вектора сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{T}_A = \{T_{Ax}, T_{Ay}, T_{Az}\}$ для серії поточних точок робочої зони, до яких за умовами технічного завдання повинен діставатися ПА.

Алгоритм роботи обчислювача упорів ЕРК у структурі, наведеній на рис. 2, пропонується

організувати з використанням ІНМ КТ. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 3.

Дамо опис алгоритму в порядку нумерації його блоків.

Блок 1. Введення значень: $\rho, v_x, d_{КТ}, C_n, C_r, C_x, S_{ПА}$. Тут також задається масив $M_{ПА}$ координат точок знаходження ПА у робочій зоні. Масив $M_{ПА}$ може бути у загальному випадку тривимірним і містити у собі координати N точок робочої зони ПА.

Блок 2. Виконання операцій присвоєння: $\vec{m} := M_{ПА}(i)$ — поточна точка робочої зони ПА; $i = 1, \dots, N$; $L := k_{КТ}|\vec{m}|$ — довжина попущеної частини КТ; $k_{КТ}$ — коефіцієнт зв’язку між глибиною робочої точки ПА та довжиною попущеної частини КТ [1]; $\{T_x = 0, T_y = 0, T_z = 0\}$ — змінні для зберігання поточного максимального значення складових вектора сили натягу КТ.

Блок 3. Отримання за допомогою ІНМ КТ вектора сили натягу на ходовому кінці КТ $\vec{T}_A = \{T_{Ax}, T_{Ay}, T_{Az}\}$ для поточної точки робочої зони ПА \vec{m} .

Блок 4. Перевірка умови $T_x < |T_{Ax}|$.

Блок 5. Виконання операції $T_x := |T_{Ax}|$.

Блок 6. Перевірка умови $T_y < |T_{Ay}|$.

Блок 7. Виконання операції $T_y := |T_{Ay}|$.

Блок 8. Перевірка умови $T_z < |T_{Az}|$.

Блок 9. Виконання операції $T_z := |T_{Az}|$.

Блок 10. Виконання операції $i := i + 1$.

Блок 11. Перевірка умови $i \leq N$.

Блок 12. Розрахунок сили лобового опору ПА R_y згідно із залежністю (3) та розрахунок значень максимальних упорів рушіїв по кожній осі напівзв’язаної системи координат відповідно до відношень (2): $F_{x\max} = T_{Ax} + R_x$; $F_{y\max} = T_{Ay}$; $F_{z\max} = T_{Az}$.

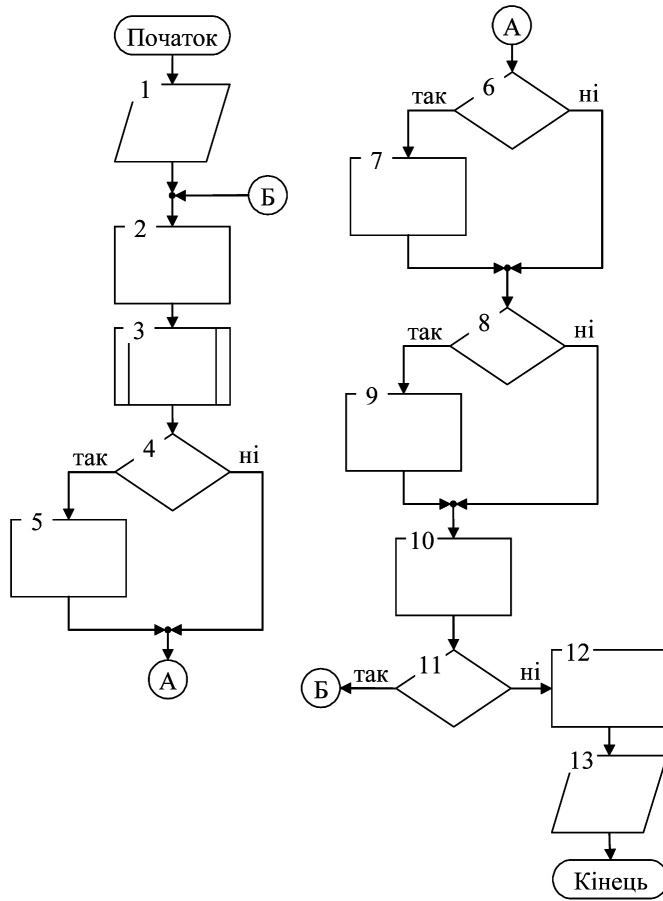


Рис. 3. Узагальнений алгоритм роботи обчислювача упорів електрорушійного комплексу на базі використання інверсної нейромережної моделі кабель-троса

Блок 13. Виведення результатів розрахунку.

У результаті застосування запропонованої методики отримуємо трійку максимальних значень упорів ЕРК ПАР $\{F_{x\max}, F_{y\max}, F_{z\max}\}$, яка може слугувати вихідними даними для попереднього розрахунку чи вибору виконавчих механізмів — гребних гвинтів та електродвигунів, прийняття рішень щодо їх кількості й взаємного розташування, попередньої оцінки масогабаритних характеристик підводного робота на ранніх етапах його створення.

ВИСНОВКИ

На основі застосування математичної моделі підводного апарата та інверсної нейромережної моделі кабель-троса розроблено узагальнену методику проектного розрахунку упорів електрорушійного комплексу прив'язного апарата-робота в залежності від заданої робочої зони, яка дає змогу науково обґрунтовано вибирати його елементи ЕРК на ранніх етапах створення підводного апарата-робота.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Блинцов В.С. Привязные подводные системы. — К.: Наукова думка, 1998. — 242 с.
- [2] Блинцов В.С., Магула В.Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. — К.: Наукова думка, 1997. — 140 с.

- [3] *Блінцов О.В.* Автоматизація керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — Ч. 7. — К.: ІЕД НАН України, 2008. — С. 54–57.
- [4] *Блінцов О.В.* Синтез системи автоматичного керування упорами рушіїв прив'язного підводного апарата в режимі квазістаціонарного просторового руху // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв: НУК, 2008. — № 1 (418). — С. 135–141.
- [5] *Вашедченко А.Н., Пышнев С.Н., Родичев А.П.* Некоторые оценочные расчеты при проектировании подводных судов: Учеб. пособие / Под общ. ред. проф. А.Н. Вашедченко. — Николаев: НКИ, 1997. — 66 с.
- [6] *Воробйов Ю.Л., Баскаков С.М.* Техніка освоєння континентального шельфу. — О.: ОНМА, 2003. — 107 с.
- [7] *Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А.* Навигация и управление движением судов: Учебник. — С.Пб.: Элмор, 2002. — 360 с.
- [8] Необитаемые подводные аппараты военного назначения / М.Д. Агеев, Л.А. Наумов, Г.Ю. Илларионов и др.; Под ред. акад. РАН М.Д. Агеева. — Владивосток: Даль-наука, 2005. — 164 с.
- [9] *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Устройства и системы управления подводных роботов. — М.: Наука, 2005. — 270 с.