

УДК 681.5:629

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ САМОХІДНОГО ПРИВ'ЯЗНОГО ПІДВОДНОГО РОБОТА НА ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Методом комп'ютерного моделювання і з використанням генератора формул Equo отримані табличні, графічні та аналітичні залежності між характеристиками робочої зони самохідного прив'язного підводного робота і вектором максимального упору двигунів для заданого діапазона швидкостей руху, а також діаметром кабель-троса як теоретична основа для виконання достовірних проектних оцінок його експлуатаційних характеристик

В. С. Блінцов

Доктор технічних наук, професор, директор
Науково-дослідний інститут підводної техніки Національного
університету кораблебудування імені адмірала Макарова
проспект Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025
Контактний тел.: (0512) 47-70-95
e-mail: blintsov@mksat.net

О. М. Киричук

Заступник директора
Департамент розробок і закупівлі озброєння та військової
техніки Міністерства оборони України
просп. Перемоги, 55/2, м. Київ, Україна, 02113
Контактний тел.: (044) 234-92-02
e-mail: kyryziuk@meta.ua

1. Постановка задачі

Самохідні прив'язні підводні роботи (СППР) належать до сучасних високоефективних засобів морської техніки і широко використовуються при виконанні пошукових, аварійно-рятувальних та інспекційних підводних робіт [1, 2]. В останні роки у зв'язку з удосконаленням конструкції СППР вони стали застосовуватись і для цілей захисту військово-морських баз та для протимінних операцій [3, 4]. При цьому до головних задач СППР відносять: моніторинг підводної обстановки на заданій акваторії відео- та гідроакустич-

ними засобами; пошук та ідентифікація виявлених підводних об'єктів; доставка у задану точку морського дна приладів та інструментів; виконання підводно-технічних робіт з застосуванням націпного підводного інструменту (маніпуляторів тощо).

За принципами функціонування СППР належить до дистанційно керованих ненаселених морських рухомих об'єктів, типовий склад обладнання якого містить власне самохідний підводний робот (ПР), його кабель-трос (КТ) та розташовані на судні-носії (СН) кабельна лебідка (КЛ) і пост енергетики й керування (ПЕК), рис. 1.

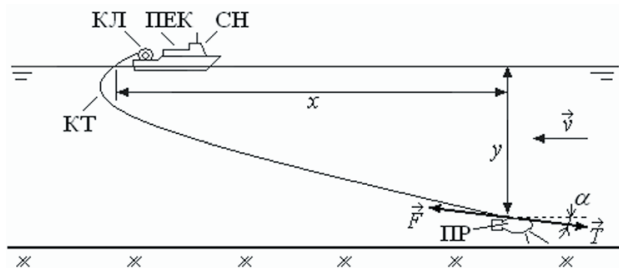


Рисунок 1. Склад самохідного прив'язного підводного робота

Такий робот, за звичай, працює в умовах зовнішніх збурень (течії, вітро-хвильової дії) і повинен забезпечувати заданий радіус робочої зони, задані швидкість та точність просторового руху відносно СН або морського дна [5]. Причому, головним джерелом збурення для ПР є його кабель-трос, який сприймає гідродинамічний вплив водного середовища та вітро-хвильову дію на корпус СН і передає їх на корпус робота. Джерелами збурення є також зміна власних параметрів ПР – маси, гідродинамічних коефіцієнтів тощо.

Існуючі підходи до проектування та експлуатації таких роботів ґрунтуються на спрощеному представленні впливу КТ на динаміку та усталений рух ПР [6-8]. В них не враховується складна просторова форма КТ, що призводить до значних похибок в оцінках його силової дії на корпус ПР і, отже до неточностей у проектних розрахунках характеристик його рухів та у визначенні розмірів робочої зони ПР. Практика свідчить, що вказані похибки суттєво викривляють оцінку продуктивності застосування СППР і, в окремих випадках, можуть навіть впливати на прийняття принципових рішень щодо розробки й застосування такої техніки.

2. Мета роботи

Метою роботи є кількісна оцінка впливу конструктивних параметрів СППР на його експлуатаційні характеристики, що дає змогу виконувати проектні розрахунки підводного робота з високою достовірністю.

3. Викладення основного матеріалу

З позицій математичного опису СППР є суттєво нелінійним об'єктом, робота якого протікає в умовах активної дії зовнішніх збурень та при нестационарності власних параметрів.

Вивчення властивостей таких об'єктів морської техніки необхідно виконувати шляхом створення адекватних математичних моделей їх функціонування та подальшого дослідження цих моделей методами комп'ютерного моделювання. Ефективним інструментом для розв'язання таких задач є спеціалізований моделюючий комплекс, який містить комп'ютерні реалізації математичних моделей основних елементів СППР, об'єднані в єдину систему для спільного використання [9].

Нижче наводяться результати комп'ютерного дослідження впливу конструктивних параметрів одного з головних елементів СППР – кабель-троса – на його експлуатаційні характеристики. Розглядається квазі-стационарний режим руху СППР, оскільки він є визначальним для оцінки ефективності його застосування.

У загальному випадку, до конструктивних параметрів КТ і ПР належать:

для КТ – діаметр d , лінійна вага у воді $\rho_{КТ}$, безрозмірні коефіцієнти нормальної й тангенціальної складових гідродинамічного опору C_n, C_t ;

для ПР – масо-габаритні характеристики (вага у воді $m_{ПР}$, габаритні розміри $L_{ПР} \times V_{ПР} \times H_{ПР}$), безрозмірні коефіцієнти гідродинамічного опору C_x, C_y, C_z у системі просторових координат $\{0x, 0y, 0z\}$, жорстко зв'язаний з центром величини ПР; максимальні значення упорів рухів $T_{x \max}, T_{y \max}, T_{z \max}$, які долають відповідні складові сили гідродинамічного опору КТ \vec{F} ; параметри начіпного підводного інструменту, які впливають на гідродинаміку корпусу ПР.

До експлуатаційних характеристик КТ і ПР належать наступні характеристики, якими можна керувати з ПЕК:

для КТ – довжина попущеної частини L , швидкість набігаючого потоку (швидкість руху СН та СППР відносно води) v , координати ходового кінця КТ відносно СН $\{x, y, z\}$, питома густина води ρ ;

для ПР – керовані значення упорів його рухів T_x, T_y, T_z .

До експлуатаційних характеристик СППР у цілому належить також максимальний радіус його робочої зони $R_{СППР}$, який при заданому максимальному значенні глибини руху ПР Y_{\max} визначається як максимальне віддалення робота від СН $R_{СППР} = X_{\max} | v = v_{\text{зад}}$ при заданій швидкості потоку води $v_{\text{зад}}$, що набігає.

Практика створення СППР свідчить, що має місце дві постановки проектною задачі:

пряма задача – визначити конструктивні параметри СППР, за яких він забезпечить задані експлуатаційні характеристики;

обернена задача – визначити експлуатаційні характеристики СППР при заданих конструктивних параметрах його елементів.

Для розв'язання обох задач доцільно отримати залежності між конструктивними параметрами та експлуатаційними характеристиками СППР в аналітичній, табличній чи графічній формах. У роботі за допомогою спеціалізованого моделюючого комплексу було виконано масові багатоваріантні розрахунки квазістационарного руху СППР у потоці води з рівномірним епіором швидкості течії по вертикалі у наступному діапазоні зміни конструктивних параметрів та експлуатаційних характеристик:

діаметр $d = 6...40$ мм;

довжина попущеної частини КТ $L_{КТ} = 350...700$ м;

швидкість потоку води, що набігає $v = 0,25...3$ м/с.

Причому, аналізувалось декілька позицій ПР відносно СН при їх синхронному квазістационарному русі: по поздовжній осі – у діапазоні $x = -300...+300$ метрів;

по глибині – у діапазоні $y = -50...-150$ метрів (знак «-» означає відлік глибини по вертикальній осі, яка скерована вгору).

Результати комп'ютерного дослідження показують, що вектор \vec{F} зусилля на ходовому (нижньому) кінці КТ і, відповідно, необхідні упори рушіїв ПР $T_{x,y,z}$ змінюються в широких межах залежно від швидкості потоку води v , що набігає на КТ і ПР, і діаметру КТ d для кожної позиції робота відносно СН. На рис. 2 наведено деякі результати дослідження для усталеної позиції ПР відносно СН $\{x = +300 \text{ м}; y = -150 \text{ м}, L_{КТ} = 500 \text{ м}\}$.

Аналіз отриманих результатів показує, що сила гідродинамічного опору КТ \vec{F} є визначальною при оцінках проектних та експлуатаційних характеристик СППР, оскільки частка гідродинамічного опору само-

го ПР складає 2...5% від опору КТ. Тому максимальні (проектні) значення рушіїв підводного робота $T_{x \text{ max}}, T_{y \text{ max}}, T_{z \text{ max}}$ практично повністю визначаються відповідними складовими вектора \vec{F} .

Виконаний у ході дослідження комп'ютерний експеримент дав змогу кількісно визначити залежності експлуатаційних характеристик СППР від їх конструктивних параметрів. Так, у результаті серії розрахунків отримано табличні та побудовано графічні залежності характеристик робочої зони СППР $R_{СППР}$ для варіантів КТ діаметром $d = 6...40 \text{ мм}$ при різних значеннях глибини руху ПР Y_{max} та швидкості потоку води v , що набігає.

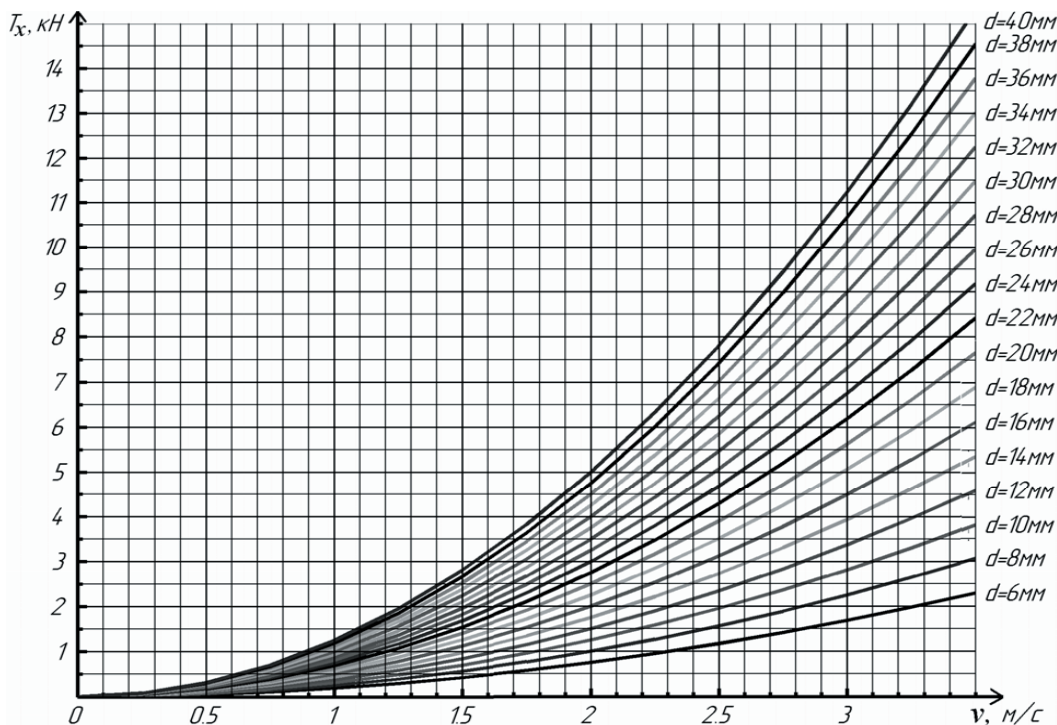


Рисунок 2. Залежності горизонтальної складової сили натягу на ходовому кінці КТ при $x = +300 \text{ м}$; $y = -150 \text{ м}, L_{КТ} = 500 \text{ м}$

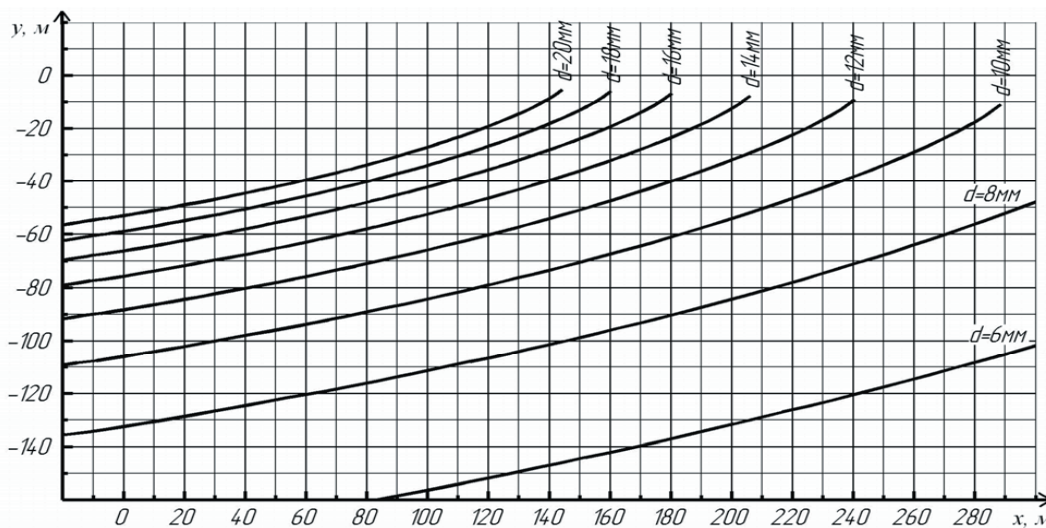


Рисунок 3. Залежності робочої зони $R_{СППР}$ (координат ходового кінця КТ ПР відносно СН) при $v = 2 \text{ м/с}$ і упорі горизонтального рушія ПР $R_x = 600 \text{ Н}$

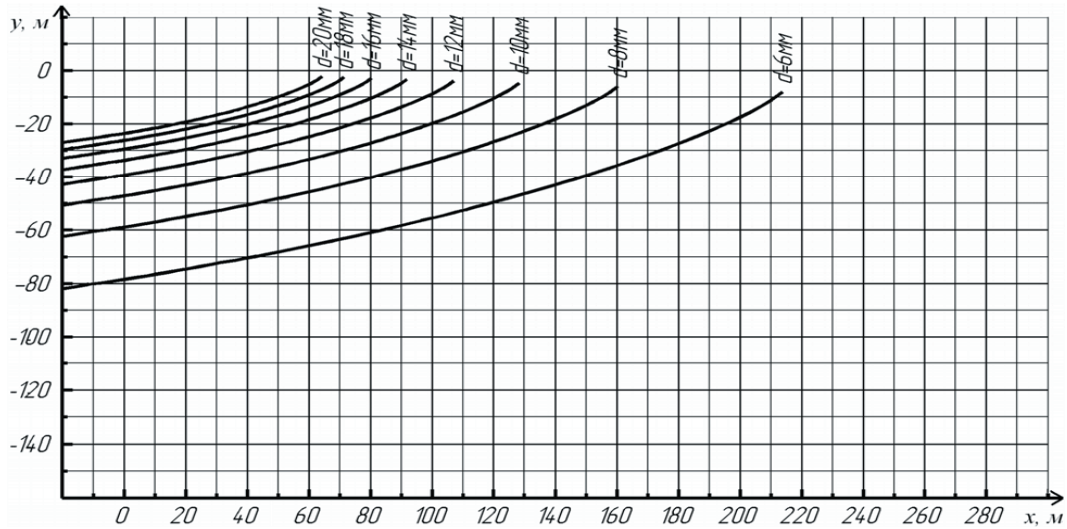


Рисунок 4. Залежності робочої зони R_{CSPR} (координат ходового кінця КТ ПР відносно СН) при $v = 3$ м/с і упорі горизонтального рушія ПР $R_x = 600$ Н

На рис. 3-4 наведено результати розрахункової оцінки робочої зони R_{CSPR} для режиму руху ПР у діаметральній площині системи «СН-КТ-ПР», коли $T_x = 600$ Н, $v = 2$ і 3 м/с. Аналогічні залежності отримано і для упорів вертикального рушія ПР T_y , а при лаговому (боковому) зміщенні ПР відносно СН – і для упорів лагового рушія T_z .

Як узагальнення отриманих комп'ютерних розрахунків було сформульовано тезу про можливість отримання аналітичних залежностей між конструктивними параметрами та експлуатаційними характеристиками СППР у векторній формі:

$$\vec{T} = \vec{f}(v, d), \tag{1}$$

яка у формі проєкцій на осі системи координат, зв'язаної з центром величини ПР:

$$T_x = f_x(v; d); T_y = f_y(v; d); T_z = f_z(v; d), \tag{2}$$

для будь-якого робочого режиму системи, який характеризується заданими координатами ходового кінця КТ $\{x, y, z\}$ та довжиною попущеної частини КТ L .

При аналізі режимів руху системи «СН-КТ-ПР» у плоскій постановці буває зручно використовувати представлення вектора \vec{T} в полярних координатах:

$$T = f(v; d); \alpha = f_\alpha(v; d), \tag{3}$$

де T – модуль вектора упору рушіїв \vec{T} ; α – кут між векторами \vec{T} та \vec{v} .

Такі залежності дали б змогу формалізувати виконання та підвищити достовірність проектних оцінок створюваної СППР, а також підвищити ефективність практичного застосування таких роботів у складних умовах експлуатації.

В результаті обробки отриманих шляхом комп'ютерного моделювання табличних залежностей характеристик робочої зони СППР R_{CSPR} для прийнятого діапазону зміни діаметру КТ при різних значеннях глибини руху ПР Y_{max} та швидкості потоку води v встановлено, що традиційні методи інтерполяції є неефективними, оскільки не забезпечують необхідної точності.

В роботі було застосовано спеціальний програмний продукт – генератор формул Equo, який ґрунтується на використанні штучних нейронних мереж і забезпечує високу якість інтерполяційних властивостей отримуваних аналітичних залежностей [10]. Як приклад, нижче наведено отриманий за його допомогою аналітичний вираз для модуля вектора натягу ходового кінця КТ T для робочої точки ПР з координатами $\{x = 300$ м; $y = -150$ м} при довжині попущеної частини КТ $L = 500$ м:

$$T = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_1x_1 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_1x_4 + a_{10}x_1x_5 + a_{11}x_2x_2 + a_{12}x_2x_3 + a_{13}x_2x_4 + a_{14}x_2x_5 + a_{15}x_3x_3 + a_{16}x_3x_4 + \tag{4}$$

$$\text{де } x_1 = v; x_2 = d; x_3 = x_1^2; x_4 = x_1 x_2; x_5 = x_2^2.$$

Значення коефіцієнтів a_i рівняння (4) наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів $a_i, i = 0...20$

a_i	Значення	a_i	Значення
a_0	-3.22216446	a_{11}	-16254.62508539
a_1	2.9493666	a_{12}	15724.24018348
a_2	560.82193467	a_{13}	6120.33903545
a_3	-0.37769365	a_{14}	791727.66400284
a_4	-181.23566119	a_{15}	0.00579542
a_5	-16254.62508539	a_{16}	-2.02421601
a_6	-0.37769365	a_{17}	-675.30998817
a_7	-181.23566119	a_{18}	-675.30998817
a_8	0.01954452	a_{19}	-120608.69957762
a_9	15724.24018348	a_{20}	-7050088.93003303
a_{10}	6120.33903545	-	-

Аналогічну структуру мають залежності (2) та (3). Відмінність полягає у цифрових значеннях та кількості коефіцієнтів a_i .

Висновки

1. Встановлено суттєву залежність експлуатаційних характеристик самохідного прив'язного підводного робота від конструктивних параметрів його кабель-троса. Отримані шляхом комп'ютерного моделювання табличні та графічні залежності між характеристиками робочої зони робота і його основним конструктивним параметром – вектором максимального упору рушіїв для заданого діапазону швидкостей руху та діаметром кабель-троса – є нелінійними залежностями, які можуть бути представлені інтерполяційними поліномами високого порядку.

2. За допомогою генератора формул Equo синтезовано основні поліноміальні залежності між конструктивними параметрами і експлуатаційними характеристиками самохідного прив'язного підводного робота як теоретичну основу для виконання достовірних проектних оцінок його експлуатаційних характеристик як нелінійного об'єкта.

Література

1. Блинцов В.С. Привязные подводные системы. – К.: Наукова думка, 1998. – 232 с.
2. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статистики и динамики. / Н.И. Виноградов, М.Л. Гутман, И.Г. Лев, М.З. Нисневич. – СПб: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2000. – 324 с.
3. Литвиненко Е. Я., Илларионов Г. Ю., Сидоренков В.В. Противоминные обитаемые подводные аппараты: Монография. СПб.: Судостроение, 2005. – 108 с.
4. Необитаемые подводные аппараты военного назначения / Сост.: М. Д. Агеев, Л. А. Наумов, Г. Ю. Илларионов и

др. Под ред. академика РАН М. Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2005. – 164 с.

5. Блинцов В.С. Современные проблемы создания электрооборудования и автоматики подводных аппаратов. // Радиотехника и компьютерные системы. Научно-технический журнал. – Национальный аэрокосмический университет им. М.С. Жуковского «Харківський авіаційний інститут», 2007, №5 (24). – С. 90-98.
6. Вашедченко А.Н., Пышнев С.Н., Родичев А.П. Некоторые оценочные расчеты при проектировании подводных судов: Уч. пособие. Под общей редакцией проф. Вашедченко А.Н. – Николаев: НКИ, 1997. – 66 с.
7. Илларионов Г.Ю., Карпачев А.А. Исследовательское проектирование обитаемых подводных аппаратов: теория, методы, результаты. Владивосток: Дальнаука, 1998. – 272 с.
8. Слижевский Н.Б., Король Ю.М. Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов. Уч. пособие. – Николаев: УГМТУ, 2000. – 93 с.
9. Блинцов В.С., Киричук О.М. Моделирующий комплекс для исследования технологий мониторингу акваторий с использованием самоходного прив'язного підводного робота. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 6 (423). – С. 48-57.
10. Програмний продукт «Генератор формул Equo». // Приватне підприємство «Інтелектуалізовані технології автоматизації і методи моделювання». – Свідоцтво на знак для товарів і послуг №65047 від 15.08.2006 р. Державного департаменту інтелектуальної власності МОН України.