

### СИНТЕЗ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНИМ КОМПЛЕКСОМ ПРИВ'ЯЗНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕРАТОРА ФОРМУЛ EQUO

Прив'язні підводні апарати (ПА) належать до широко розповсюджених у морській практиці самохідних підводних керованих по кабель-тросу (КТ) роботів. Призначення КТ – забезпечення ПА електроенергією та двохстороннім інформаційним обміном між ПА та судно-носієм (СН) [1]. Рух ПА по заданій траєкторії виконується завдяки роботі його електрорушійного комплексу (ЕРК), який, за звичай, складається з трьох гребних електродвигунів (ЕД) маршового, бокового та вертикального руху, що передають крутільні моменти на гребні гвинти через відповідні редуктори й валопроводи. Розглянемо особливості побудови системи автоматичного керування (САК) квазістаціонарним рухом ПА, коли приданими масами води його елементів можна нехтувати.

Оцінки можливих реалізацій САК електромеханічними об'єктами показали, що наявність інверсних моделей об'єктів керування суттєво підвищує якість керування [2]. Проте з-за суттєвої нелінійності елементів ПА (КТ, ЕРК, корпус ПА), що рухаються у потоці води, отримання достовірних інверсних математичних моделей (ИММ) або нейронмережних моделей цих елементів є складною задачею, а їх використання для управління рухом ПА у реальному часі вимагає значних обчислювальних ресурсів бортової системи керування.

Метою роботи є синтез простих для обчислення законів керування ЕРК ПА для квазістаціонарних режимів його руху у формі алгебраїчних залежностей упорів рушій від координат просторового положення ПА.

Узагальнена структура САК просторовим рухом ПА на основі ИММ його складових наведена на рис. 1, де позначено: ЗТ – задатчик траєкторії руху ПА;  $\vec{T}$  – послідовність точок траєкторії, яких має дістатися ПА; ХЗС – блок характеристик зовнішнього середовища; ИММ КПА – ИММ корпусу ПА, генерує вектор  $\vec{F}_h$  гідродинамічного опору корпусу ПА; ИММ ЕРК – генерує сигнал керування ЕД  $\vec{U}$ ;  $\vec{P}$  – координати фактичного положення ПА;  $\vec{V}_f$  – вектор течії. Конструкція ПА виконана так,

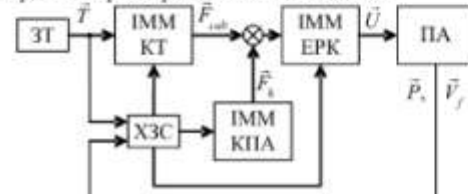


Рис. 1. Структура САК рухом ПА на основі ИММ його складових.

що упори рушій ЕРК  $F_{x,z}$  прикладені до центру мас ПА, тому вважаємо, що обертові моменти на його корпусі не утворюються. Кожний рушій ЕРК компенсує суму відповідних складових векторів  $\vec{F}_{cab}$  та  $\vec{F}_h$ , тому закон зміни кожної складової вектора  $\vec{F}_{cab} = f(\vec{T}, \vec{P}, \vec{V}_f)$  і є шуканим законом керування відповідним рушієм ЕРК з урахуванням нелінійних ИММ ЕРК та КПА. Розглянемо тепер особливості синтезу ИММ КТ, оскільки ИММ ЕРК наведено в [3], а вектором  $\vec{F}_h$  нехтуємо, тому що для роботи на глибинах шельфу (до 500 метрів) справедливим є відношення  $\vec{F}_h \ll \vec{F}_{cab}$  [1].

Математичну модель квазістаціонарного руху КТ як абсолютно гнучкої нитки з нульовою плавучістю наведено в [1] у вигляді аналітичної залежності  $\{x_{cabf}, y_{cabf}\} = f_{dir}(\vec{F}_{cab}, \vec{C}_{cab})$ , де  $x_{cabf}$  та  $y_{cabf}$  – координати ходового кінця КТ (поточні координати ПА) в площині,  $\vec{C}_{cab}$  – вектор, складовими якого є характеристики КТ і зовнішнього середовища. Розрахунок координат ходового кінця КТ в [1] виконується чисельним методом, тому отримати ИММ КТ  $\vec{F}_{cab} = f_{inv}(x_{cabf}, y_{cabf}, \vec{C}_{cab})$  шляхом її розв'язання відносно силових характеристик КТ  $\vec{F}_{cab}$  виявилось неможливим. Автором розроблено математичне й алгоритмічне забезпечення для підбору чисельних значень складових вектора  $\vec{F}_{cab}$ , які б відповідали заданим  $x_{cabf}$  та  $y_{cabf}$  [4], що є по суті інверсною моделлю КТ в площині, але її застосування як складової САК неможливе з-за великих обсягів обчислень.

Пропонується аналітичну залежність  $\vec{F}_{cab} = f_{inv}(x_{cabf}, y_{cabf}, \vec{C}_{cab})$  отримувати за допомогою генератора формул Equo [5], який дає змогу апроксимувати залежності однієї чи декількох змінних, представлених табличними даними. При цьому достатньо синтезувати ИММ КТ тільки для одного базового варіанту його характеристик ( $\vec{C}_{cab} = \text{const}$ ). Перехід від базових характеристик КТ в площині до заданих просторових викладено в [3, 6].

Силові характеристики КТ суттєво нелінійні, тому пропонується розділити площу досяжності ходового кінця КТ на декілька ділянок для підвищення точності ИММ КТ. Такий розподіл зручно виконувати в полярній системі координат. Перехід від декартових координат до полярних і навпаки виконується за залежностями:

$$R = \sqrt{x_{cabf}^2 + y_{cabf}^2}; \beta = \left| \pi - \left| \arccos \frac{x_{cabf}}{R} \right| \right| + \pi; \quad x_{cabf} = R \cos \beta; y_{cabf} = R \sin \beta,$$

де  $R$ [м],  $\beta$ [рад] – координати ходового кінця КТ в полярній системі координат.

Необхідні табличні дані отримуємо за допомогою ПЗ QUASTEC [4] для таких базових характеристик КТ: довжина КТ  $L = 100$  м; діаметр КТ  $D_{cab} = 0,02$  м; коефіцієнти нормальної та тангенціальної складових гідродинамічного опору КТ  $C_n = 1, C_t = 0,1$ ; питома густина води  $\rho = 1024$  кг/м<sup>3</sup>;  $V_f = -2$  м/с. Для підвищення точності IMM обмежуємо максимальну відстань від СН до ПА  $R_{max} = 50$  м.

За допомогою генератора формул Ецю було отримано IMM КТ для розрахунку силових характеристик КТ при  $R_{max} = 50$  м у вигляді залежностей  $F_{cab} = f_1(R, \beta), \alpha = f_2(R, \beta)$ , де  $f_1$  та  $f_2$  – степеневі поліноми  $f'$  виду:

$$f = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8 + a_9x_9 + a_{10}x_1x_1 + a_{11}x_1x_2 + a_{12}x_1x_3 + a_{13}x_1x_4 + a_{14}x_1x_5 + a_{15}x_1x_6 + a_{16}x_1x_7 + a_{17}x_1x_8 + a_{18}x_1x_9 + a_{19}x_2x_2 + a_{20}x_2x_3 + a_{21}x_2x_4 + a_{22}x_2x_5 + a_{23}x_2x_6 + a_{24}x_2x_7 + a_{25}x_2x_8 + a_{26}x_2x_9 + a_{27}x_3x_3 + a_{28}x_3x_4 + a_{29}x_3x_5 + a_{30}x_3x_6 + a_{31}x_3x_7 + a_{32}x_3x_8 + a_{33}x_3x_9 + a_{34}x_4x_4 + a_{35}x_4x_5 + a_{36}x_4x_6 + a_{37}x_4x_7 + a_{38}x_4x_8 + a_{39}x_4x_9 + a_{40}x_5x_5 + a_{41}x_5x_6 + a_{42}x_5x_7 + a_{43}x_5x_8 + a_{44}x_5x_9 + a_{45}x_6x_6 + a_{46}x_6x_7 + a_{47}x_6x_8 + a_{48}x_6x_9 + a_{49}x_7x_7 + a_{50}x_7x_8 + a_{51}x_7x_9 + a_{52}x_8x_8 + a_{53}x_8x_9 + a_{54}x_9x_9. \quad (1)$$

де  $x_1 = R, x_2 = \beta, x_3 = x_1x_1, x_4 = x_1x_2, x_5 = x_2x_2, x_6 = x_1x_1x_1, x_7 = x_2x_2x_2, x_8 = x_1x_1x_2, x_9 = x_1x_2x_2$ .

При розрахунку  $F_{cab} = f_1(R, \beta)$  та  $\alpha = f_2(R, \beta)$  коефіцієнти  $a_n, n = 1, 2, 3, \dots, 54$ , приймають значення, вибірково наведені у табл. 1 та 2.

Таблиця 1. Вибіркові значення коефіцієнтів  $a_n$  для розрахунку  $F_{cab} = f_1(R, \beta)$ .

$a_n$	Значення	$a_n$	Значення	$a_n$	Значення	$a_n$	Значення
$a_0$	292,25372205876079	$a_1$	122,43313681615	$a_2$	-306,10593891703786	$a_3$	-0,08349268556714
...							
$a_{51}$	0,025325619673573	$a_{52}$	-7,116204062E-06	$a_{53}$	-0,000114607154361	$a_{54}$	0,003387746723031

Таблиця 2. Вибіркові значення коефіцієнтів  $a_n$  для розрахунку  $\alpha = f_2(R, \beta)$ .

$a_n$	Значення	$a_n$	Значення	$a_n$	Значення	$a_n$	Значення
$a_0$	5,9181197674957593	$a_1$	-0,071287471530384	$a_2$	0,101251613835034	$a_3$	-0,004249452909849
...							
$a_{51}$	0,000127071191768	$a_{52}$	-1,3445599E-08	$a_{53}$	-2,8184812E-07	$a_{54}$	-4,792329763E-06

Таким чином, рівняння (1) разом з табл. 1-2 утворюють IMM КТ при незмінних характеристиках КТ  $\bar{C}_{cab} = \text{const}$  для  $R \leq 50$  м, а в сукупності з рівняннями подібності характеристик КТ [3] – для  $R \leq 0,5L$ . Для відстаней ПА від СН  $R \in [50, 100]$  м також можливо синтезувати IMM КТ за допомогою генератора формул Ецю.

Оцінку точності отриманої IMM КТ виконано шляхом порівняння складових вектора  $\bar{F}_{cab}$ , отриманих за допомогою ПЗ QUASTEC, з отриманими на моделі для її робочої області  $R \leq 50$  м при однакових вхідних значеннях. Відносна середня похибка не перевищує 0,37%, що задовольняє вимогам проектної практики.

Таким чином, отримана за допомогою генератора формул Ецю IMM КТ у сукупності з IMM ЕРК [3] утворює закон керування ЕРК ПА.

#### ВИСНОВОК

За допомогою генератора формул Ецю методом апроксимації комп'ютерних даних синтезовано інверсну математичну модель кабель-троса прив'язного підводного апарата, яка може бути складовою системи автоматичного керування його просторовим рухом і реалізується простими обчислювальними процедурами.

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Блинцов В.С. Привязные подводные системы – К.: Наукова думка, 1998. – 232 с.
- [2] Клепиков В.Б., Палис Ф., Цепковский Ю.А. Гибридные нейронные сети в управлении нелинейными электромеханическими системами // Вестник НТУ "ХПИ" Сборник научных трудов "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика", – Харьков: Вып.10. Т.1. 2003. – С. 29-33.
- [3] Блинцов О.В. Автоматизация керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі. // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". Ч. 7. –К.: ІЕД НАН України, 2008. – С. 54-57.
- [4] Блинцов О.В. Підвищення ефективності розрахунків характеристик кабель-троса прив'язної підводної системи. // Восточно-європейский журнал передовых технологий – 2008, – №2/2 (32). – С. 36-40.
- [5] Програмний продукт «Генератор формул Ецю». // Приватне підприємство "Інтелектуалізовані технології автоматизації і методи моделювання". – Свідчення на знак для товарів і послуг №65047 від 15.08.2006 р. Державного департаменту інтелектуальної власності МОН України.
- [6] Блинцов О.В. Синтез системи керування упорами рушіїв прив'язного підводного апарата в режимі квазі-стаціонарного просторового руху. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 1 (418). – С. 82-91.