

DOI 10.15589/jnn20160413  
 УДК 681.5:629.58  
 Б69

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF UNDERWATER COMPLEX BRANCH WITH FLEXIBLE CONNECTIONS

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЛАНКОЮ ПІДВОДНОГО КОМПЛЕКСУ З ГНУЧКИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Oleksandr V. Blintsov  
 alex\_blintsov@ukr.net  
 ORCID: 0000-0003-0426-1219

О. В. Блінцов,  
 канд. техн. наук, доц.

*Lviv Polytechnic National University, Lviv*

*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів*

**Abstract.** Synthesis of automatic control systems (ACS) of spatial motion of underwater systems with flexible connections (USFC) forms the actual scientific problem. Own nonlinearity remotely operated underwater vehicle (ROV) enhanced nonlinearity flexible connections that make up USFC. Synthesis of ACS and USFC link forms the basis for automatic control of both onelink and multilink USFC. The method of the formalization of USFC structure is in the form of a graph model. It is represented on the basis of defined-controlled units of USFC. The method of inverse dynamics is synthesized from the regulators spatial movement of TPA and cable winches to control the length of the flexible part of the issued bonds. A BAC USFC link, which includes TPA, a cable winch and synthesized regulators, is the basis for the automation of spatial movement of onelink and multilink USFC. Computer simulation work of NAO investigates USFC link. The result is quite satisfactory for the automatic management of objects of such complexity.

**Keywords:** underwater complex; remotely operated vehicle; umbilical cable; cable winch; automatic control.

**Анотація.** Запропоновано спосіб формалізації структури підводного комплексу з гнучкими зв'язками (ПКГЗ), який дає змогу виділити керовані ланки в ньому. Синтезовано систему автоматичного керування (САК) ланкою ПКГЗ у складі розроблених інверсних регуляторів телекерованого підводного апарата та кабельної лебідки. Методом комп'ютерного моделювання досліджено розроблену САК. Отриманий результат утворює основу для синтезу САК багатоланковими ПКГЗ.

**Ключові слова:** підводний комплекс; телекерований підводний апарат; кабель-трос; кабельна лебідка; автоматичне керування.

**Аннотация.** Предложен способ формализации структуры подводного комплекса с гибкими связями (ПКГС), который дает возможность выделить управляемые звенья в нём. Синтезирована система автоматического управления (САУ) звеном ПКГС в составе разработанных инверсных регуляторов телеуправляемого подводного аппарата и кабельной лебедки. Методом компьютерного моделирования исследована разработанная САУ. Полученный результат является основой для синтеза САУ многозвенными ПКГС.

**Ключевые слова:** подводный комплекс; телеуправляемый подводный аппарат; кабель-трос; кабельная лебедка; автоматическое управление.

## REFERENCES

- [1] Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Norway, John Wiley & Sons Ltd, 2011. 596 p.
- [2] Blintsov V. S., Magula V. E. *Proektirovanie samohodnyih privyaznyih podvodnyih sistem*. Kyiv: Naukova dumka, 1997. 140.
- [3] Dudykevych, V., Blintsov O. Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. *Eureka: Physics and Engineering*, 2016, no. 5, pp. 25–36.
- [4] Vinogradov N. I., Gutman M. L., Lev I. G., Nisnevich M. Z. *Privyaznye podvodnye sistemy. Prikladnye zadachi statiki i dinamiki* [Tie-submarine system. Applied problems of statics and dynamics]. Saint Petersburg, SPb. Unta Publ., 2000. 324 p.
- [5] Ramesh R., Ramadass N., Sathianarayanan D., Vedachalam N., Ramadass G. A. Heading control of ROV RO-SUB6000 using non-linear model-aided PD approach. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, no. 3(4), pp. 382–393.

- [6] 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*, 2008, no. 56, pp. 670–677.
- [7] Bessa W. M., Dutra M. S., Kreuzer E. Dynamic positioning of underwater robotic vehicles with thruster dynamics compensation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, no. 10, 325 p.
- [8] Soltan R. A., Ashrafioun H., Muske K. R. (2011). ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels. *Robotica*, 2011, no. 29(5), pp. 691–703.
- [9] 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*, 2014, no. 11 (1), 16 p.
- [10] Do K. D. Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships. *Journal of Marine Science and Application*, 2011, no. 10 (3), pp. 325–332.
- [11] Veremey E. I. Dynamical correction of control laws for marine ship's accurate steering, *Journal of Marine Science and Application*, 2014, no. 13 (2), pp. 127–133.
- [12] Blintsov S. V., Doan F. T. *Avtomatyzatsiia keruvannia pidvodnym aparatom v umovakh nevyznachenosti yoho parametriv* [Automation control of underwater vehicle with uncertain parameters] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2013, no. 4, pp. 89–93.
- [13] Rúa S, Vásquez R. E. Development of a low-level control system for the ROV Visor3. *International Journal of Navigation and Observation*, 2016, no. 12.
- [14] Soyly S., Proctor A. A., Podhorodeski R. P., Bradley C., Buckham B. J. Precise trajectory control for an inspection class ROV. *Ocean Engineering*, 2016, no. 111, pp. 508–523.
- [15] Blintsov O. V., Nadtochii V. A. *Systema avtomatychnoho keruvannia kabelnoiu lebidkoiu pryviaznoi pidvodnoi systemy* [The automatic control system of cable tethered underwater winch systems] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2013, no. 1, pp. 77–82.
- [16] Krutko P. D. *Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya. Tsikl lektsiy* [Inverse problems of dynamics in control theory. Series of lectures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 576 p.
- [17] Blintsov O. 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*, 2016, no. 4 (2 (82)), pp. 42–50.
- [18] Blintsov O. Architectural and structural type of self-propelled tethered underwater vehicles with improved maneuverability. *Pidvodni tekhnologii* [Underwater technologies], 2016, vol. 3, pp. 31–40.
- [19] Pantov Ye. N., Makhin N. N., Sheremetov B. B. *Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov* [Basic theory of the motion of submersible vehicles]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 216 p.
- [20] *Spravochnik po teorii korablya. T. 1* [Handbook of ship theory. Chapter 1] *Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli* [Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship propellers]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.
- [21] Blintsov O. V. *Matematychna model dynamiky prostorovoho rukhu kabel-trosa pryviaznoi pidvodnoi systemy* [The mathematical model of the dynamics of the spatial motion cable-tethered underwater cable system] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2012, no. 5–6 (445), pp. 61–63.
- [22] Blintsov S. V. *Teoretychni osnovy avtomatychnoho keruvannia avtonomnymu pidvodnymu aparatomu* [Theoretical Foundations of automated control autonomous underwater vehicles]. Mykolaiv, NUK Publ., 2014. 222 p.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Підводні комплекси з гнучкими зв'язками (ПКГЗ) представляють собою клас підводної техніки, який застосовується для виконання широкого спектру робіт на морі [1, 2]. Основними елементами ПКГЗ є морські рухомі об'єкти (МРО) та гнучкі зв'язки (ГЗ) [3]. До МРО належать надводні судна забезпечення (СЗ) та прив'язні підводні апарати (ПА). Серед ПА виділяють самохідні телекеровані підводні апарати (ТПА), буксирівані, опускні та інші типи ПА. Гнучкі зв'язки зазвичай представлено кабель-тросами (КТ), кабель-буксирами, а також якірними ланцюгами.

Автоматизація керування ПКГЗ є актуальною науковою проблемою, оскільки ручне керування такими складними об'єктами потребує узгодженої роботи досвідчених судноводіїв, операторів ТПА та палубної команди. Характерною ознакою ПКГЗ є можливість виконання тривалих підводних місій. Якість виконуваної роботи при цьому значно погіршується з плином часу при ручному керуванні. Автоматизація окремих режимів руху ТПА та інших МРО, які входять до складу ПКГЗ, не вирішує проблему в цілому, оскільки ручне керування все одно домінує над автоматичним.

З позиції теорії автоматичного керування ПКГЗ є суттєво нелінійним об'єктом. При цьому власні нелінійності МРО посилюються нелінійностями ГЗ, що ускладнює проблему синтезу САК. Додатково проблема ускладнюється тим, що ПКГЗ як об'єкт керування складається з елементів, які мають різні фізичні властивості: МРО представляє собою об'єкт з зосередженими параметрами, ГЗ — з розподіленими [4].

Структурно ПКГЗ відрізняються кількістю ланок та порядком їх з'єднання. Приклад одноланкового та двохланкового ПКГЗ з послідовним з'єднанням ланок наведено на рис. 1.

Ланка ПКГЗ складається з ТПА, кабельної лебідки (КЛ) та ГЗ. Рух ТПА здійснюється завдяки його рушійним пристроям. Керування гнучким зв'язком забезпечується кабельною лебідкою.

Синтез САК ланкою ПКГЗ є основою для автоматичного керування як одноланкових, так і багатоланкових ПКГЗ.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

При розв'язку завдань автоматизації керування просторовим рухом елементів ПКГЗ застосовуються різноманітні підходи. Головним об'єктом автоматизації зазвичай є ТПА, оскільки він є основним виконавцем підводної роботи.

Для ТПА робочого класу в [5] запропоновано САК його курсом на основі ПІД-подібного регулятора. Вона забезпечує плавне керування при низькій швидкості руху, характерній для ТПА робочого класу. Вплив КТ на ТПА в роботі не враховується.

Систему високоточного керування глибиною ПА на основі адаптивного нечіткого регулятора в режимі ковзання запропоновано в [6]. Виходом розробленого регулятора є керуюча сила, що вимагає розробки додаткового регулятора для рушійного пристрою. Такий регулятор автори запропонували в [7], використовуючи схожий підхід. Але в роботах не наводиться інформація про застосування таких регуляторів при суттєвих проявах впливу ГЗ.

Систему обходу перешкод та планування траєкторії для безпечного надводного судна запропоновано в [8]. Систему автоматичного керування

чотирма ступенями свободи ТПА запропоновано в [9]. В даних роботах для синтезу САК було використано метод керування в режимі ковзання. Але вплив КТ в роботах не розглядається.

Систему автоматичної стабілізації надводного судна покрововим методом «бекстепінг» запропоновано в [10]. Систему автоматичного керування курсом надводного судна з блоком динамічного коригування збуджуючи впливів морських хвиль запропоновано в [11]. Але для керування судном забезпечення у складі ПКГЗ в таких системах має враховуватись вплив ГЗ.

Оптимальну за швидкодією САК одновимірним рухом ТПА в умовах невизначеності запропоновано в [12]. Але через суттєвий обсяг експерименту використання запропонованої САК доцільне лише для одновимірних рухів ТПА при несуттєвих впливах ГЗ.

Багатовимірну САК на основі ПІД-регуляторів для керування ТПА з чотирма ступенями рухливості розроблено в [13]. Але дослідження роботи САК в умовах впливу ГЗ в роботі не наводиться.

Для ТПА інспекційного класу з чотирма керованими ступенями свободи розроблено САК траєкторним рухом в [14]. Основну увагу в роботі приділено керуванню в умовах неповної параметричної інформації про об'єкт керування. Але керований вплив ГЗ на ТПА в роботі не розглядається.

Систему автоматичного керування кабельною лебідкою як складовою прив'язної підводної системи з ТПА запропоновано в [15]. В роботі розглядається квазістаціонарний режим руху ГЗ і не враховується динаміка його впливу на ТПА.

Аналіз наукових публікацій показує, що САК синтезуються в основному для окремих ступенів свободи МРО: надводних суден та ТПА. Вплив ГЗ на рух МРО та роботу САК при цьому або не розглядається, або розглядається як невизначений. Такий підхід обмежує застосовність пропонуваніх САК режимами або повільного руху ТПА, або його руху за відсутності течії. Керування довжиною випущеної частини ГЗ розглядається з позицій мінімізації сил його гідродинамічного опору в квазістаціонарних режимах руху ТПА.

Сучасні вимоги до якості САК при виконанні підводних робіт потребують, по-перше, урахування збуджуючих впливів ГЗ, по-друге, здійснювати не тільки оперативне керування ТПА, а і керування динамікою зміни довжини випущеної частини ГЗ. Відомості про автоматичне керування просторовим рухом ТПА з урахуванням впливу ГЗ на його рух, а також про керування ланкою ПКГЗ як цілісним об'єктом в науковій літературі відсутні.

**МЕТА РОБОТИ** — розробка системи автоматичного керування ланкою підводного комплексу з гнучкими зв'язками у складі регулятора просторового руху телекерованого підводного апарата та регулятора кабельної лебідки для керування довжиною кабель-троса як основи для автоматичного

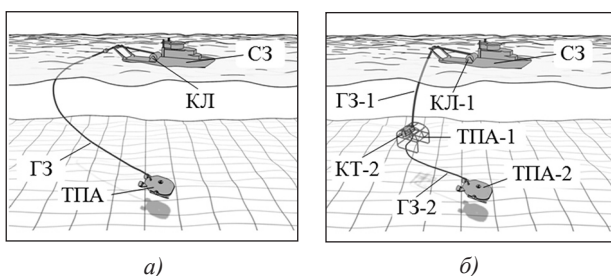


Рис. 1. Підводні комплекси з гнучкими зв'язками: а) одноланковий; б) двохланковий

керування одноланковими та багатоланковими підводними комплексами з гнучкими зв'язками.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Структура ПКГЗ у цілому визначається кількістю МРО, які входять до його складу, та конфігурацією гнучких зв'язків між ними. В даній роботі структуру ПКГЗ пропонується формалізувати на основі теорії графів. Графова модель ПКГЗ відображатиме фізичні зв'язки між його елементами ПКГЗ і надаватиме первинну уяву про ПКГЗ як об'єкт керування.

Об'єкти з зосередженими параметрами — МРО — представимо вершинами (вузлами), об'єкти з розподіленими параметрами — ГЗ — представимо ребрами (ланками), які символізують зв'язок пари МРО. Тоді структуру ПКГЗ можна представити зв'язним скінченним графом:

$$G = (R, C), \quad G \neq \emptyset;$$

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}, \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_n\}, \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

де  $R$  — множина МРО, які входять до складу ПКГЗ;  $C$  — множина ГЗ, які входять до складу ПКГЗ.

Кожний ГЗ в структурі ПКГЗ представлено 2-х елементною підмножиною  $c_j$  множини  $R$ . Це означає, що кожний ГЗ з'єднує два МРО.

Зазвичай в ГЗ виділяють корінний та ходовий кінці: ходовий кінець зазвичай закріплюється на ПА, корінний кінець — на СЗ. Зміна довжини ГЗ виконується на корінному кінці за допомогою КЛ.

На графівій моделі ПКГЗ ходовий кінець ГЗ позначимо стрілкою. Це означатиме, що КЛ встановлено на тому МРО, від якого спрямовано стрілку. Додатково можна вказувати ваги ребер, які відповідатимуть довжинам випущених частин ГЗ.

Наявність кабельної лебідки (КЛ) впливає на рух МРО при її роботі через особливості взаємодії ГЗ з середовищем. Так, при роботі КЛ на МРО виникають додаткові сили внаслідок поздовжнього руху ГЗ в середовищі. Тому орієнтування графівій моделі ПКГЗ дає первинну уяву про процеси, які протікають в ПКГЗ, при зміні довжини випущеної частини ГЗ.

До графівій моделі ПКГЗ можна застосовувати операції розщеплення та ототожнення вершин, стягування ребер. Ці операції еквівалентні морським процедурам розгортання та згоргання ПКГЗ. Розщеплення та ототожнення вершин позначає відповідно випуск та прийняття ПА на борт СЗ. Стягування ребра відповідає підбору ГЗ та прийому ПА на борт СЗ. Операції ототожнення вершин та стягування ребра не еквівалентні, оскільки при прийнятті ПА на борт ГЗ може залишитись випущеним, що утворить на графівій моделі петлю.

В структурі ПКГЗ однозначно має бути визначено, які вершини можна ототожнювати. Якщо дві

вершини можна ототожнити, то це означає, що на МРО передбачено можливість прийняття на борт іншого МРО. У зв'язку з цим графівій модель ПКГЗ пропонується доповнити множиною  $H$  (hangar), яка визначатиме МРО носіїв:

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_m\}, \quad i = 1, 2, \dots, m;$$

$$h_i \subset R, \quad h_i \neq R.$$

Кожний елемент  $h_i$  представляє собою власну підмножину  $R$  і показує, які МРО знаходяться на його борту в згорнутому стані. Якщо на деякому  $i$ -му МРО не передбачено можливості прийняття на борт іншого МРО, то для нього  $h_i = \emptyset$ . Граф  $G$  в сукупності з множиною  $H$  формалізує структуру ПКГЗ.

Розглянемо класичну одноланкову прив'язку підводну систему з ТПА та надводним СЗ. Оскільки роботи можуть виконуватись на якірній стоянці СЗ, то для повноти опису слід враховувати також ГЗ, який з'єднує СЗ та якір. В згорнутому стані така ППС представляє собою МРО, на борту якого знаходяться ПА та якір, при виконанні робіт синхронним рухом СЗ та ПА або при динамічній стабілізації СЗ комплекс розгортається до виду одноланкового ПКГЗ, при роботі з якірної стоянки ПКГЗ формалізується двохланковою структурою (рис. 2).

Формальний опис структури ПКГЗ має такий вид:

$$G = (R, C); \quad R = \{1, 2, 3\};$$

$$C = \{c_1, c_2\}; \quad c_1 = \{1, 2\}; \quad c_2 = \{1, 3\};$$

$$H = \{h_1, h_2, h_3\}; \quad h_1 = \{2, 3\}; \quad h_2 = \emptyset; \quad h_3 = \emptyset.$$

Елементи 1 та 2 з'єднано ГЗ, його довжина складає  $l_1$ , КЛ встановлено на  $r_1$ . Елементи 1 та 3 з'єднано ГЗ, його довжина складає  $l_2$ , і він також керується з СЗ.

Таким чином, одноланкову ППС в залежності від розташування її елементів можна представити структурою з трьома різними станами. В згорнутому стані це нуль-ланковий ПКГЗ. Судно забезпечення є утворюючим елементом для ПКГЗ. Випуск ПА переводить ПКГЗ в одноланковий стан. Постановка СЗ на якір переводить ПКГЗ в двохланковий стан.

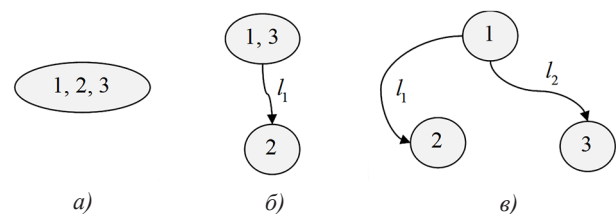


Рис. 2. Структури ПКГЗ:

а) СЗ з ПА на борту та піднятим якорем; б) СЗ з випущеним ПА та піднятим якорем; в) СЗ на якірній стоянці з випущеним ПА

В кожному з таких станів ПКГЗ як об'єкт керування має свої особливості. До першої ланки ПКГЗ належать КЛ, КТ та ТПА. До другої ланки ПКГЗ належать судновий брашпиль, якірний ланцюг та якір.

Синтезуємо регулятори просторового руху ТПА та КЛ методом оберненої динаміки [16] з застосуванням принципу декомпозиції еталонної моделі [17].

В ролі ТПА оберемо апарат, побудований на основі архітектурно-конструктивного типу з удосконаленою керованістю [18]. Блок плавучості ТПА розташовується за обтічником в його верхній частині і забезпечує пасивну стабілізацію крену та диференту. Рушійний комплекс ТПА містить три реверсивні рушійні пристрої, розташовані перпендикулярно один до одного (рис. 3).

Ступені свободи ТПА зазвичай подають по відношенню до зв'язаної системи координат (ЗСК)  $O_a x_a y_a z_a$ , яка переміщується та обертається разом з ТПА. Рух ТПА у цілому розглядають в базовій системі координат (БСК)  $O_b x_b y_b z_b$ , яка вважається нерухомою по відношенню до Землі. Також приймається припущення про інерційність БСК.

Обертовий рух технологічного обладнання ТПА здійснюється обертовою платформою по відношенню до корпусу ТПА. У зв'язку з цим такий ТПА потребує синтезу регулятора тільки для поступальних ступенів свободи.

Закон керування синтезуватимемо в матричній формі. Оберемо еталонну субмодель для позиційних кінематичних параметрів ТПА у вигляді диференціального рівняння першого порядку:

$$\begin{aligned} \dot{R}_d &= [\text{diag} \{ \tau_R \}]^{-1} (R_g - R) + \dot{R}_g; \\ \tau_R &= [\tau_x \tau_y \tau_z \infty \infty]; \\ R_g &= [\vec{r}_g \vec{q}_g]^T = [x_g y_g z_g 0 0 0]^T; \\ R &= [\vec{r} \vec{q}]^T = [x y z \theta \varphi \psi]^T; \end{aligned}$$

де  $\tau_R$  — матриця постійних часу еталонної субмоделі;  $R_g$  — матриця заданих позиційних кінематичних параметрів ТПА, точкою позначено похідну за часом;

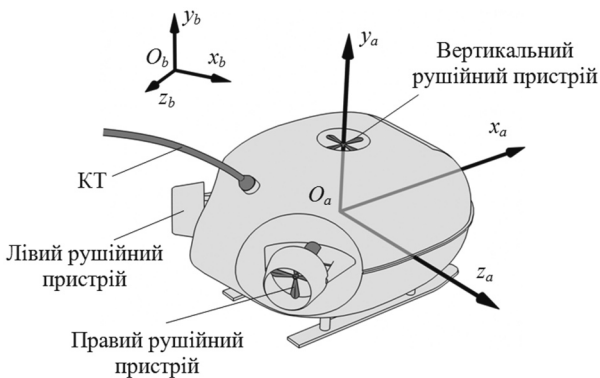


Рис. 3. Системи координат та рушійні пристрої ТПА

$R$  — матриця реальних позиційних кінематичних параметрів ТПА;  $\vec{r}_g$  та  $\vec{r}$  — відповідно вектори поступальних заданих та фактичних позиційних кінематичних параметрів ТПА;  $\vec{q}_g$  та  $\vec{q}$  — відповідно вектори обертових заданих та фактичних позиційних кінематичних параметрів ТПА;  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  — відповідно кути крену, диференту та ристання ТПА (кути Ейлера).

Перші три елементи матриць  $\tau_R$  та  $R_g$  відповідають за поступальний рух. Останні три елементи матриць  $\tau_R$  та  $R_g$  відповідають за обертовий рух. Оскільки ТПА керується тільки за поступальними ступенями свободи, то останні три елементи матриці  $\tau_R$  прийнято рівними нескінченності, а матриці  $R_g$  — нулю. Останні три елемента матриці  $R_g$  можна задавати будь-якими іншими константними значеннями. Їх величини не впливатимуть на роботу регулятора, оскільки ТПА не має можливості здійснювати керований рух за обертовими ступенями свободи.

Динаміка руху ТПА як твердого тіла описується законами кількості руху та моменту кількості руху [19]. Скористуємося матричною формою запису основного закону динаміки ТПА. Якщо розв'язати її відносно рівнодіючих зовнішніх сил та моментів, то отримаємо інверсну модель динаміки руху ТПА:

$$\begin{cases} V_d = K_V^{-1} \dot{R}_d - V_s; \\ T_d = I \dot{V}_d - KIV, \end{cases}$$

де  $V_d$  — матриця бажаних значень швидкостей руху ТПА по відношенню до води в проекціях на осі ЗСК;  $V_s$  — матриця поправки на течію;  $K_V$  — кінематична матриця зв'язку позиційних та швидкісних кінематичних параметрів ТПА розміром  $6 \times 6$ ;  $I$  — матриця власних та приєднаних мас ТПА;  $K$  — матриця, яка враховує переносний рух при взятті похідної по відношенню до ЗСК;  $T_d$  — матриця бажаних рівнодіючих сил та моментів ТПА.

Матриці інверсної моделі динаміки ТПА утворюються наступним чином:

$$\begin{aligned} K_V &= \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix}; \\ K_v &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}; \\ K_\omega &= \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1}. \end{aligned}$$

$$V_s = [\bar{v}_s \ 0_{1 \times 3}]^T;$$

$$V = [\bar{v} \ \bar{\omega}]^T = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T;$$

$$I = M + \Lambda =$$

$$= \text{diag} \{m, m, m, j_x, j_y, j_z\} + \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{61} & \cdots & \lambda_{66} \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_z & v_y & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_z & 0 & -v_x & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -v_y & v_x & 0 & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

де  $K_v$  — матриця зв'язку між проекціями вектора  $\bar{v}$  на осі ЗСК та БСК;  $K_\omega$  — матриця зв'язку між проекціями вектора  $\bar{\omega}$  на осі ЗСК та швидкостями зміни кутів Ейлера;  $\bar{v}_s$  — вектор швидкості течії по відношенню до БСК, елементи якого задаються в ЗСК;  $\bar{v}$  та  $\bar{\omega}$  — відповідно вектори поступальної та оберткової швидкостей руху ТПА;  $M$  — матриця мас та моментів інерції ТПА;  $m$  — маса ТПА;  $j_x, j_y, j_z$  — моменти інерції ТПА, розраховані по відповідних осях ЗСК;  $\Lambda$  — матриця приєднаних мас та моментів інерції рідини;  $\lambda_{ij}$  — приєднані маси рідини,  $i = 1, 2, \dots, 6$ ,  $j = 1, 2, \dots, 6$ .

Матриця  $\Lambda$  симетрична, тобто  $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$ . Елементи матриці  $\Lambda$  залежать виключно від геометрії зовнішньої поверхні ТПА.

На основі матриці  $T_d$  розраховуються матриця бажаних рушійних сил та моментів  $T_{pd}$ :

$$T_{pd} = [\bar{F}_d \ \bar{M}_d] = [F_{xd} \ F_{yd} \ F_{zd} \ M_{xd} \ M_{yd} \ M_{zd}]^T,$$

$$T_{pd} = T_d - T_h - T_g - T_b - T_u - T_{unc};$$

де  $T_h$  — матриця гідродинамічних (в'язких) сил та моментів;  $T_g$  — матриця гравітаційних сил та моментів;  $T_b$  — матриця сил та моментів плавучості;  $T_u$  — матриця сил та моментів кабель-троса;  $T_{unc}$  — матриця поправки на невизначені сили та моменти;  $\bar{F}_d$  — вектор бажаної сили рушійного комплексу;  $\bar{M}_d$  — вектор бажаного моменту рушійного комплексу, його елементи ігноруються, оскільки ТПА є некерованим за обертковими ступенями свободи.

Елементи матриць  $T_{h,g,b,u}$  розраховуються на основі відомих математичних моделей відповідно гідродинаміки корпусу ТПА [20], впливу сил ваги та плавучості, а також динаміки впливу ГЗ [21] в проекціях на осі ЗСК.

Елементи матриці  $T_{unc}$  отримуються на виході компенсаційного контуру, в основі якого також застосовується інверсна модель ТПА, але замість його бажаних прискорень в рівняння підставляють фактичні прискорення ТПА з минулого кроку роботи САК [22].

Наступним кроком розраховується упор кожного рушійного пристрою ТПА. Напрямки дії рушійних пристроїв утворюють ортонормований базис, тому бажані упори для кожного рушійного пристрою ТПА можна знайти з наступного виразу:

$$F_i = \text{proj}(\bar{F}_d, \hat{a}_i), \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\hat{a}_1 = \text{ort}(\{1, 0, -1\}_A); \quad \hat{a}_2 = \text{ort}(\{1, 0, 1\}_A);$$

$$\hat{a}_3 = \text{ort}(\{0, -1, 0\}_A),$$

де  $\hat{a}_i$  — орт, який визначає напрямок прямої дії  $i$ -го рушійного пристрою;  $\text{proj}$  — функція, яка розраховує проекцію вектора, який подано першим аргументом, на вектор, який подано другим аргументом;  $\text{ort}$  — векторна функція, яка розраховує одиничний вектор від її аргумента.

Індекси 1, 2 та 3 відповідають правому, лівому та вертикальному рушійним пристроям. Індекс  $A$  означає, що координати вектора подано в базисі  $A$ , тобто в базисі ЗСК.

У випадку, коли напрямки дії рушійних пристроїв не утворюють ортонормований базис, можна скористатись рівняннями зв'язку з [18].

Інерційність рушійних пристроїв значно менша, ніж інерційність ТПА. Тому можна прийняти припущення про миттєву зміну упору гребного гвинта при зміні керуючого впливу електродвигуна і представити інверсну модель рушійного пристрою у вигляді наступної залежності:

$$u_i = f_{inv}(F_{d(i)}, v_{s(i)}),$$

де  $v_s$  — поступальна швидкість руху гребного гвинта по відношенню до води,  $u$  — сигнал керування.

Функція  $f_{inv}$  враховує параметри гребного гвинта та електродвигуна, але не враховує динаміки перехідних процесів, які протікають в рушійному пристрої.

Наступним етапом синтезуємо регулятор кабельної лебідки методом оберненої динаміки. Виконавчим механізмом КЛ є електродвигун постійного струму. Відомо, що електричні процеси, які протікають в електродвигуні постійного струму, значно швидші, ніж його механічні процеси. У зв'язку з цим приймемо припущення, що струм змінюється миттєво при зміні напруги, тоді інверсна модель електродвигуна КЛ прийме наступний вигляд:

$$\begin{cases} k_m i = J \dot{\omega}_w + k_l \omega_w + Q_w + M_{unc}; \\ k_u u = R i + k_m \omega_w, \end{cases}$$

де  $R, i$  — відповідно опір та струм якоря електродвигуна;  $k_u$  — коефіцієнт підсилення перетворювача напруги (драйвера) рушійного пристрою;  $u$  — сигнал керування КЛ;  $k_m$  — лінійний параметр, який характеризує електромеханічні властивості електродвигуна;  $J$  — момент інерції системи «ротор — редуктор — кабельний барабан», приведений до кабельного барабана;  $k_l$  — параметр, який характеризує момент опору обертання ротора електродвигуна;  $\dot{\omega}_{wd}$  — бажане прискорення кутової частоти обертання барабана КЛ;  $\omega_w$  — фактична кутова частота обертання барабана КЛ;  $Q_w$  — момент навантаження, який виникає на кабельному барабані через дію КТ;  $M_{unc}$  — момент, який характеризує вплив невизначеностей на роботу рушійного пристрою.

Величина  $M_{unc}$  отримується на виході компенсаційного контуру, в основі якого також застосовується інверсна модель кабельної лебідки, але замість бажаного кутового прискорення в рівняння підставляють фактичне кутове прискорення барабана КЛ з минулого кроку роботи регулятора.

Величина  $\dot{\omega}_{wd}$  обчислюється за допомогою еталонної моделі:

$$\begin{cases} \dot{L}_g = \frac{L_g - L_r}{\tau_L}; \\ \omega_{wg} = \frac{\dot{L}_g}{r_w}; \\ \dot{\omega}_{wd} = \frac{\omega_{wg} - \omega_w}{\tau_w}, \end{cases}$$

де  $L_g$  — бажана довжина випущеної частини ГЗ;  $L_r$  — фактична довжина випущеної частини ГЗ;  $\tau_L$  та  $\tau_w$  — постійні часу еталонної моделі;  $r_w$  — радіус ба-

рабана КЛ;  $\omega_{wd}$  — бажане значення кутової швидкості обертання барабана КЛ.

Система автоматичного керування ланкою ПКГЗ складається з інверсного регулятора ТПА з блоком утримання керованості та інверсного регулятора КЛ (рис. 4).

На рис. 4 позначено:  $F_{ur}$  — сила, з якою КТ впливає на КЛ;  $T_{uf}$  — матриця сил та моментів КТ, які діють на ТПА;  $U = \{u_1, u_2, u_3\}$  — множина керуючих впливів ТПА.

Моделювання розробленої САК було виконано для ланки ПКГЗ, параметри якої зведено в табл. 1.

Постійні часу еталонних моделей САК було обрано наступні:

$$\tau_R = [1 \quad 1 \quad 1 \quad \infty \quad \infty \quad \infty] \text{ с};$$

$$\tau_V = 0,25\tau_R; \quad \tau_w = 1 \text{ с}.$$

Швидкість течії задамо вектором:

$$\vec{v}_s = \{-0,5, 0, 0\}_B \text{ м/с}.$$

Задачу для регулятора ТПА сформуємо як послідовність шляхових точок:

$$\vec{r}_{g1} = \{0, -30, 0\}; \quad \vec{r}_{g2} = \{0, -30, 10\};$$

$$\vec{r}_{g3} = \{10, -30, 0\}; \quad \vec{r}_{g4} = \{0, -30, -10\};$$

$$\vec{r}_{g5} = \{-10, -30, 0\}; \quad \vec{r}_{g6} = \{0, -30, 0\}.$$

Переключення на наступну задану координату виконуватимемо за наступною умовою:

$$|\vec{r}_g - r| \leq 0,1 \text{ м}.$$

Задачу для регулятора КЛ сформуємо як функцію поточних координат ТПА:

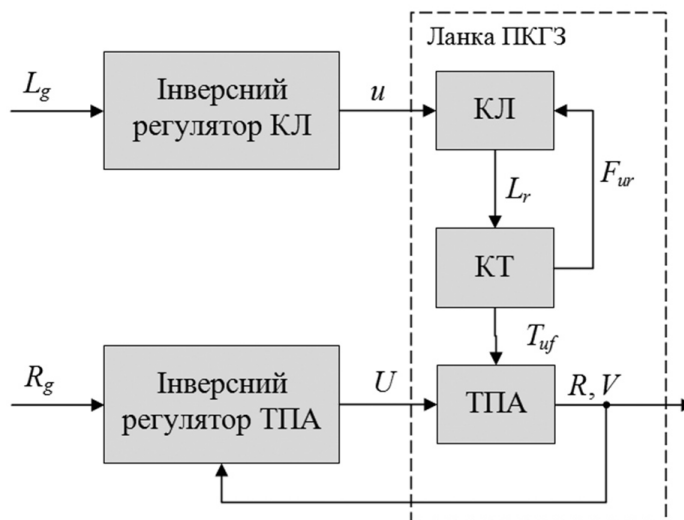


Рис. 4. Структура САК ланкою ПКГЗ

Таблиця 1. Параметри ланки ПКГЗ

| Параметр  | Значення  |
|---|---|
| Форма корпусу:<br>– довжина;<br>– висота;<br>– ширина   | Трьохосовий еліпсоїд:<br>– 0,90 м;<br>– 0,35 м;<br>– 0,65 м |
| Плавучість  | Нульова   |
| Маса  | 100 кг  |
| Рівнодіюча сил ваги та плавучості                       | 120 Н   |
| Точка прикладення рівнодіючої сил ваги та плавучості    | $\{0, 0, 1, 0\}_A$ м  |
| Потужність рушійного пристрою                           | 500 Вт  |
| Коефіцієнт підсилення драйвера рушійного пристрою       | 310   |
| Діапазон допустимих керуючих впливів рушійного пристрою | $[-1, 1]$ В   |
| Повна довжина кабель-троса                              | 100 м   |
| Точка кріплення ходового кінця кабель-троса на ТПА      | $\{-0,2, 0,2, 0\}_A$ м                                      |

$$L_g = 2 |\vec{r}|.$$

Результати моделювання показали, що тривалість перехідних процесів ТПА, коли контури САК не знаходяться в режимі насичення, не перевищує 3 с, перерегулювання не перевищує 0,2 м. Тривалість перехідних процесів КЛ не перевищує 2 с, перерегулювання не перевищує 0,1 м.

Отриманий результат є цілком задовільний для автоматичного керування об'єктами такої складності і утворює основу для синтезу САК просторовим рухом одноланкових та багатоланкових ПКГЗ та їх комплексної автоматизації.

**ВИСНОВКИ.** 1. Запропоновано спосіб формалізації структури підводного комплексу з гнучкими зв'язками у вигляді графової моделі, яка дає змогу отримати первинну уяву про підводний комплекс з гнучкими зв'язками як об'єкт керування та виділити керовані ланки в ньому.

2. Синтезовано систему автоматичного керування ланкою підводного комплексу з гнучкими зв'язками у складі розроблених інверсних регуляторів просторового поступального руху телекерованого підводного апарата та кабельної лебідки для керування довжиною випущеної частини гнучкого зв'язку. Вона є основою для комплексної автоматизації одноланкових та багатоланкових підводних комплексів з гнучкими зв'язками.

3. Методом комп'ютерного моделювання досліджено розроблену систему автоматичного керування ланкою підводного комплексу з гнучкими зв'язками. Результати моделювання показали цілком задовільну якість роботи системи автоматичного керування. Розроблена система утворює основу для синтезу систем автоматичного керування просторовим рухом одноланкових та багатоланкових ПКГЗ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Fossen, T. I.** Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control [Text] / T. I. Fossen. — Norway : John Wiley & Sons Ltd, 2011. — 596 p.
- [2] **Блинцов, В. С.** Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула. — К. : 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. — Issue 5. — Pp. 25–36.
- [4] **Виноградов, Н. И.** Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики [Текст] / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисневич. — СПб : Изд-во СПб. Ун-та, 2000. — 324 с.
- [5] **Ramesh, R.** Heading control of ROV ROSUB6000 using non-linear model-aided PD approach / R. Ramesh, N. Ramadass, D. Sathianarayanan, N. Vedachalam, G. A. Ramadass // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2013. — Vol. 3. — Issue 4. — Pp. 383–393.
- [6] **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. — Issue 56. — Pp. 670–677.
- [7] **Bessa, W. M.** Dynamic positioning of underwater robotic vehicles with thruster dynamics compensation [Text] / W. M. Bessa, M. S. Dutra, E. Kreuzer // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2013. — Issue 10:325. — 8 p. doi: 10.5772/56601.



- [8] **Soltan, T. A.** ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels [Text] / R. A. Soltan, H. Ashrafioun, K. R. Muske // *Robotica*. — 2011. — Vol. 29. — Issue 5. — Pp. 691–703.
- [9] **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. — Issue 11:1. — 16 p.
- [10] **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. — Vol. 10. — Issue 3. — Pp. 325–332.
- [11] **Veremey, E. I.** Dynamical correction of control laws for marine ship's accurate steering [Text] / E. I. Veremey // *Journal of Marine Science and Application*. — 2014. — Vol. 13. — Issue 2. — Pp. 127–133.
- [12] **Блінцов, С. В.** Автоматизація керування підводним апаратом в умовах невизначеності його параметрів [Текст] / С. В. Блінцов, В. Ф. Тхы // *Сборник научных трудов НУК*. — 2013. — № 4. — Pp. 89–93.
- [13] **Rúa, S.** Development of a low-level control system for the ROV Visor3 [Text] / S. Rúa, R. E. Vásquez // *International Journal of Navigation and Observation*. — 2016. — Vol. 2016. — 12 p.
- [14] **Soylu, S.** Precise trajectory control for an inspection class ROV [Text] / S. Soyly, A. A. Proctor, R. P. Podhorodeski, C. Bradley, B. J. Buckham // *Ocean Engineering*. — 2016. — Vol. 111. — Pp. 508–523.
- [15] **Блінцов, О. В.** Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов, В. А. Надточій // «Збірник наукових праць НУК». — 2013. — № 1. — С. 77–82.
- [16] **Крутько, П. Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций [Текст] : уч. пос. / П. Д. Крутько. — М. : Машиностроение, 2004. — 576 с.
- [17] **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. — Issue 4/2 (82). — Pp. 42–50.
- [18] **Blintsov, O.** Architectural and structural type of self-propelled tethered underwater vehicles with improved maneuverability. [Text] / O. Blintsov // *Міжнародний науково-виробничий журнал «Підводні технології, промислова та цивільна інженерія»*, 2016. — № 3. — С. 31–40.
- [19] **Пантов, Е. Н.** Основы теории движения подводных аппаратов [Текст] / Е. Н. Пантов, Н. Н. Махин, Б. Б. Шереметов. — Ленинград : Судостроение, 1973. — 216 с.
- [20] *Справочник по теории корабля. Т. 1* [Текст] / под ред. Я. И. Войткунского // *Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители*. — Ленинград : Судостроение, 1985. — 768 с.
- [21] **Блінцов, О. В.** Математична модель динаміки просторового руху кабель-троса прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // «Збірник наукових праць НУК». — 2012. — № 5–6 (445). — С. 61–63.
- [22] **Блінцов, С. В.** Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами [Текст] : монографія / С. В. Блінцов. — Миколаїв : НУК, 2014. — 222 с.

© О. В. Блінцов

Надійшла до редколегії 15.08.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов