

DOI 10.15589/jnn20170308
 УДК 656.61:629.5
 Б69

SPECIALIZED SIMULATING COMPLEX FOR STUDYING MOTION DYNAMICS OF THE TOWED UNDERWATER SYSTEM

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ МОДЕЛЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ПІДВОДНОЇ БУКСИРУВАНОЇ СИСТЕМИ

Oleksandr V. Blintsov
 alex_blintsov@ukr.net
 ORCID: 0000-0003-0426-1219

Volodymyr V. Sokolov
 sokolov@yuzhmash.com
 ORCID: 0000-0002-7015-0464

О. В. Блінцов,
 канд. техн. наук, доц.¹

В. В. Соколов,
 інженер²

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*SE «Production Association Yuzhny Machine-Building Plant named after A.M. Makarov», Dnipro*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*ДП «ВО Південний машинобудівний завод імені Макарова», м. Дніпро*

Abstract. There is developed a specialized simulating complex for computer-aided study of the efficiency of automatic control systems for the underwater towed system «carrier ship — tether winch — tether — towed underwater vehicle». The complex includes mathematical models of the dynamics of a marine moving object, flexible connection and tether winch. The former is used to simulate the spatial motion dynamics of a towing vessel and a towed underwater vehicle as solid bodies in a water flow. Tether simulation employs a method of simulating a flexible connection with automatic control of the axial motion of its elements, which makes it possible to account for the dynamics of the change in the length of its released part. The model of the tether winch dynamics provides simulation of the tether release and gathering. The simulation complex enables studying the spatial motion of a towed underwater vehicle in the water column in relation to the towing vessel as a control object at the dynamic change of the length of the released part of the tether.

Keywords: simulating complex; towed underwater vehicle; towing cable dynamics; spatial motion.

Анотація. Розроблено спеціалізований моделюючий комплекс для комп'ютерного дослідження ефективності систем автоматичного керування підводною буксирною системою у складі «судно-носій — кабельна лебідка — кабель-буксир — буксирований підводний апарат». Моделюючий комплекс дає змогу досліджувати просторовий рух у водній товщі буксированого підводного апарата відносно судна-буксирувальника як об'єкта керування при динамічній зміні довжини випущеної частини кабель-буксира.

Ключові слова: моделюючий комплекс; буксирований підводний апарат; динаміка кабель-буксира; просторовий рух.

Аннотация. Разработан специализированный моделирующий комплекс для компьютерного исследования эффективности систем автоматического управления подводной буксируемой системой в составе «судно-носитель — кабельная лебедка — кабель-буксир — буксируемый подводный аппарат». Моделирующий комплекс позволяет исследовать пространственное движение в водной толще буксируемого подводного аппарата относительно судна-буксировщика как объекта управления при динамическом изменении длины выпущенной части кабель-буксира.

Ключевые слова: моделирующий комплекс; буксируемый подводный аппарат; динамика кабель-буксира; пространственное движение.

REFERENCES

- [1] Yegorov V. I. *Podvodnye buksiruemye sistemy : ucheb. posobie* [Underwater towed systems: Study guide]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 304 p.
- [2] Ikonnikov I. B., Gavrilov V. M., Puzyrev G. V. *Podvodnye buksiruemye sistemy i bui neytralnoy plavuchestii* [Underwater towed systems and buoys of neutral buoyancy]. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ., 1993. 224 p.

- [3] Poddubnyy V. I., Shamarin Yu. Ye., Chernenko D. A., Astakhov L. S. *Dinamika podvodnykh buksiruemyykh sistem* [Dynamics of underwater towed systems]. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ., 1995. 200 p.
- [4] Fang M. C., Hou C.S., Luo J.H. On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect. *Ocean Engineering*, 2007, no. 34 (8-9), pp. 1275-1289.
- [5] Kostenko V. V., Makeeva I. G. *Issledovanie vliyaniya kabelya svyazi na manevrennost teleupravlyаемого podvodnogo apparata* [Study on the influence of a communication cable on the maneuverability of a remotely operated underwater vehicle]. *Podvodnyie issledovaniya i robototekhnika — Underwater Research and Robotics*, 2009, no. 1 (17), pp. 22–27.
- [6] Veltishev V. V. *Uproshchyonnoe predstavlenie gibkogo kabelya peremennoy dliny dlya modelirovaniya dinamiki teleupravlyаемого podvodnogo kompleksa* [Simplified presentation of a variable-length flexible tether for simulating the dynamics of a remotely operated underwater complex]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Ser: «Mashinostroenie», Spets. vyipusk «Spetsialnaya robototekhnika i mehatronika» — Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Mechanical Engineering Series, special issue «Specialized robotics and mechatronics»*, 2012, pp. 32–39.
- [7] Srivastava V. K. Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science and Application*, 2014, no. 13 (2), pp. 185–192.
- [8] Yang B. K., Zhu K. Q., Zhu Y. J., Qin D. W. Dynamic response of towed line array. *Journal of Hydrodynamics, Ser: B*, 2013, no. 25 (14), pp. 616–619.
- [9] Park J., Kim N. Dynamics modeling of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a towfish towed by a cable. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, no. 7 (2), pp. 409–425.
- [10] Blintsov A. V., Burunina Zh. Yu., Klimenko P. G., Dyk Ch. T. *Spetsializirovannyi modeliruyushchii kompleks dlya issledovaniya effektivnosti sistemy upravleniya podvodnoy buksiruemoy sistemoy* [Specialized modeling complex for studying the efficiency of the control system for an underwater towed system]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universitetu koralebuduvannia — Collection of scientific publications of NUOS*, 2012, no. 1 (442), pp. 92–97.
- [11] Blintsov O. V., Nadtochii V. A. *Modeliuyuchi kompleks dlia doslidzhennia dynamiky rukhu pryv'язnoi pidvodnoi systemy «sudno-nosii — pidvodnyi aparat — manipuliator»* [Simulating complex for studying motion dynamics of the tethered underwater system «carrier ship — underwater vehicle — manipulator»]. *Visnyk Natsionalnoho universitetu koralebuduvannia (elektronne vydannia) — Bulletin of NUOS (electronic edition)*, 2012, no. 3, pp. 261–266.
- [12] 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.
- [13] Lukomskiy Yu. A., Peshekhonov V. G., Skorokhodov D. A. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov. Uchebnyk*. [Navigation and ship movement control. Study guide.]. Elmor, 2002. 360 p.
- [14] Blintsov O. Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 1, issue 9, pp. 4–16.
- [15] 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, vol. 4, issue 2 (82), pp. 42–50.
- [16] Blintsov O. Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 1, issue 7, pp. 4–14.
- [17] Blintsov O. V., Nadtochii V. A. *Systema avtomatychnoho keruvannia kabelnoiu lebidkoiu pryv'язnoi pidvodnoi systemy* [Automatic control system for the cable winch of a tethered underwater system]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universitetu koralebuduvannia — Collection of scientific publications of NUOS*, 2013, no. 1 (446), pp. 77–82.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розвиток буксируваних технічних засобів дослідження підводного простору та освоєння його мінеральних і харчових ресурсів має велику історію [1–3]. На цей час підводні буксирувані системи (ПБС) широко застосовуються для вивчення й освоєння Світового океану з-за низки переваг у порівнянні з іншими видами підводної робототехніки:

– можливостей обстеження великих обсягів водної товщі та значних площ донної поверхні з високою продуктивністю, оскільки швидкості буксирування становлять зазвичай 6...12 вузлів і більше;

– можливостей комплексного дослідження параметрів водного середовища шляхом установки на буксируваних підводних апаратах необхідної кількості різнотипної пошукової та дослідницької апаратури;

– оперативної обробки отримуваної інформації про підводне середовище у реальному часі;

– відносній простоті конструкції та низькій вартості створення ПБС у порівнянні з самохідними підводними апаратами-роботами.

Типовими підводними завданнями для ПБС є:

– вимірювання гідрофізичних та гідрохімічних параметрів водного середовища;

– вивчення рельєфу та структури морського дна та цифрове картографування донної поверхні та виявлених на ній підводних об'єктів з географічною прив'язкою;

– відео-, гідроакустичний та магнітометричний пошук підводних об'єктів у водній товщі, на донній поверхні та під шаром ґрунту;

– імпульсне зондування морського дна з метою пошуку корисних копалин на морському шельфі;

– обстеження, документування та картографування протяжних інженерних підводних об'єктів (підводних кабелів, трубопроводів тощо).

Постійно зростаючі вимоги до якості фото- і відеозйомки морського дна та підводних об'єктів в умовах дії на ПБС значних зовнішніх збурень, а також високі вимоги до точності визначення географічних координат виявлених підводних об'єктів роблять актуальним завдання підвищення точності роботи систем автоматичного керування (САК) рухом буксированого підводного апарата (БПА), зокрема, в режимах його просторового переміщення відносно судна-буксирувальника.

Дослідження ефективності синтезованих САК на ранніх етапах проектування ПБС доцільно виконувати за допомогою спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК), який містить бібліотеку математичних моделей (ММ) елементів ПБС (буксированих апаратів, буксирних лебідок та кабельних ліній) і бібліотеку існуючих і синтезованих під час проектування ПБС регуляторів і систем автоматичного керування (САК) просторовим рухом елементів ПБС.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Математичні моделі просторового руху СБ та БПА як твердих тіл в потоці води в цілому добре вивчені і успішно застосовуються у складі моделюючих комплексів більш складних об'єктів — прив'язних підводних систем різних типів [3]. Основною складністю для моделювання останніх є забезпечення моделювання силової взаємодії між елементами системи з урахування динаміки гнучкого зв'язку — кабель-троса або кабель-буксира (КБ).

Відомо про моделі прив'язних підводних систем з урахуванням усталеного впливу кабель-троса на підводний апарат. Використання таких моделей спрощує розробку моделюючого комплексу та зменшує вимоги до розрахункових ресурсів. Так, напри-

клад, в [4] розроблено модель динаміки просторового руху прив'язного підводного апарата. Вплив кабель-троса при цьому моделюється як усталений на основі ітеративного методу стрільби для розв'язку задачі пошуку граничних умов на його кінцях. В роботі [5] розроблено математичну модель усталеного руху кабель-троса, яка дає змогу оцінити його вплив на маневреність прив'язного підводного апарата. В роботі [6] пропонується математична модель усталеного руху кабелю в площині зі змінною довжиною випущеної частини. Але моделі усталеного руху гнучкого зв'язку не враховують його динаміки, що обмежує їх застосування для дослідження окремих режимів руху прив'язних підводних систем.

В роботі [7] представлено тривимірну модель гідродинаміки ПБС. Головні рівняння КБ складено на основі сегментного методу. Рівняння КБ були апроксимовані із застосуванням методу скінченних різниць з неявною схемою розрахунку, що для розв'язку потребує застосування ітеративного методу Ньютона. При цьому для забезпечення точності моделювання, достатньої для розв'язку задач дослідження САК ПБС, необхідно збільшувати кількість сегментів КБ, що ризиком збільшить вимоги до розрахункових ресурсів.

Відомо про моделі ПБС, в яких для моделювання КБ застосовується метод зосереджених мас та еластичних зв'язків. Так, в [8] модель КБ з урахуванням ефектів згинання та скручування була використана для моделювання кругового горизонтального маневру буксированої системи. В [9] розроблено модель напівзаглибного автономного підводного апарата з КБ та гідролокатором бокового огляду. Але застосування таких моделей для ПБС з нерозтяжними КБ супроводжується суттєвим збільшенням вимог до розрахункових ресурсів.

Найбільш повно питання математичного моделювання та комп'ютерного дослідження руху ПБС як об'єкта керування розглянуто в роботах [10, 11]. Проте, у зазначених дослідженнях розглядається лише рух БПА у діаметральній площині судна-буксирувальника (СБ). Це не дає можливості оцінювати ефективність САК ПБС зокрема при відхиленнях БПА від діаметральної площини СБ по горизонталі та в цілому при дослідженні просторового руху БПА.

МЕТА РОБОТИ — удосконалення структури та синтез базового математичного забезпечення спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження динаміки просторового руху підводної буксированої системи як об'єкта керування.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

До складу досліджуваної ПБС входять СБ, КБ, БПА та лебідка (Л) рис. 1.

На СБ розташовується лебідка та пост енергетики і керування (ПЕК). Корінний кінець КБ закріплюється на лебідці, ходовий кінець — на БПА. На БПА вста-

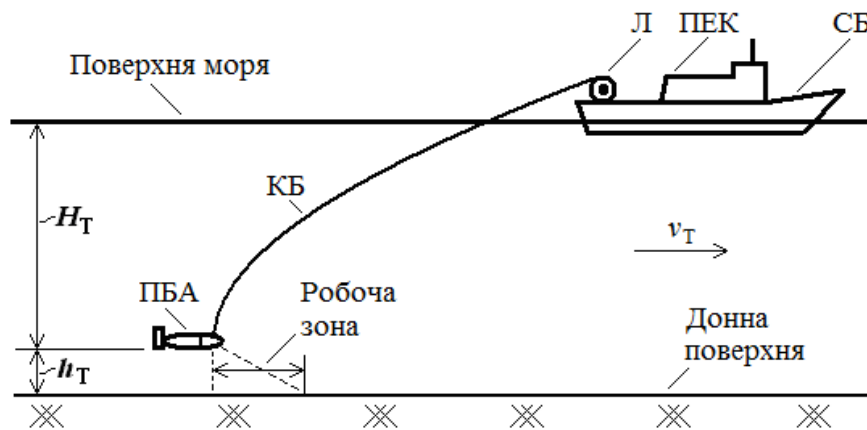


Рис. 1. Склад типової підводної буксированої системи

новлюється приладове обладнання, яке відповідає конкретній підводній місії ПБС. Керування просторовим рухом БПА забезпечується його хвостовим оперенням (ХО).

До головних експлуатаційних режимів такої ПБС належать:

- поздовжній рух БПА у діаметральній площині СБ зі стабілізацією глибини занурення H_T ;
- поздовжній рух БПА у діаметральній площині СБ зі стабілізацією висоти над ґрунтом h_T ;
- просторовий рух БПА з керуванням відхиленням від діаметральної площини СБ та одночасною стабілізацією глибини занурення H_T ;
- просторовий рух БПА з керуванням відхиленням від діаметральної площини СБ та одночасною стабілізацією висоти над ґрунтом h_T .

Розробку СМК будемо виконувати згідно модульному принципу, запропонованому в [12], на основі узагальнених структур ММ елементів ПБС. Для моделювання МРО зазвичай застосовуються базова система координат (БСК), проміжна зв’язана система координат (ПСК) та зв’язана систем координат (ЗСК), їх докладний опис наведено в [13].

Так, математична модель динаміки просторового руху морського рухомого об’єкта (МРО), тобто БПА або СБ, як твердого тіла має форму системи нелінійних матричних диференціальних рівнянь [14]:

$$\frac{d_A V}{dt} = I^{-1} (T - KIV); \quad \frac{d_B R}{dt} = K_V (V + V_s); \quad (1)$$

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

$$R = [\vec{r} \ \vec{q}]^T = [x \ y \ z \ \theta \ \varphi \ \psi]^T;$$

$$T = [\vec{F} \ \vec{M}]^T = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T;$$

$$I = M + \Lambda; \quad V_s = [\vec{v}_s \ 0_{1 \times 3}]^T;$$

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

$$K_V = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix};$$

$$K_\omega^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$K_v = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta)) & (\sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta)) & -\sin \varphi \sin \psi \sin \theta \end{bmatrix};$$

де V, R — матриці відповідно швидкісних та позиційних кінематичних параметрів МРО; I — матриця мас та моментів інерції МРО розміром 6×6 ; T — матриця рівнодіючих сил \vec{F} та моментів \vec{M} , які діють на МРО; K_V — кінематична матриця зв’язку позиційних та швидкісних кінематичних параметрів МРО розміром 6×6 ; V_s — матриця поправки на швидкість течії; $\vec{v}, \vec{\omega}$ — вектори відповідно поступальної та обертової швидкостей МРО; $v_{x,y,z}, \omega_{x,y,z}$ — проекції векторів відповідно \vec{v} та $\vec{\omega}$ на осі ЗСК; \vec{r} та \vec{q} — вектори відповідно поступальних та обертових координат МРО; x, y, z — поступальні координати МРО; θ, φ, ψ — обертові координати МРО (кути Ейлера); $F_{x,y,z}, M_{x,y,z}$ — проекції векторів відповідно \vec{F} та \vec{M} на осі

ЗСК; M , Λ — матриці відповідно власних мас і моментів інерції МРО та приєднаних мас і моментів інерції води розміром 6×6 ; \vec{v}_s — вектор швидкості течії; K_v — матриця зв'язку між ЗСК та БСК; K_ω — матриця зв'язку між проекціями вектора $\vec{\omega}$ на осі ЗСК та швидкостями зміни кутів Ейлера, тобто кінематична матриця зв'язку обертового руху МРО.

Елементи матриці сил та моментів T , тобто вектори \vec{F} та \vec{M} , утворюються за принципом суперпозицій з трьох складових: реактивні, рушійні та зовнішні сили і моменти. Реактивні сили та моменти розділяються на інерційні та в'язкі. Перші враховуються приєднаними масами рідини. Останні зазвичай представляють у вигляді суми лінійної та квадратичної залежностей від швидкості руху МРО по відношенню до водного середовища. Рушійні сили та моменти виникають в результаті роботи рушійного комплексу МРО. До зовнішніх сил та моментів відносять сили тяжіння і спливання та збурюючий вплив КБ.

Основний закон динаміки МРО у вигляді матричних рівнянь (1) можна застосовувати в прямій формі для моделювання руху МРО та в інверсній формі для синтезу САК його просторовим рухом методом оберненої динаміки [15]. На відміну від відомих форм запису власні маси та моменти інерції МРО M та приєднані маси та моменти інерції рідини Λ зведено в окрему матрицю I . Це дає змогу застосовувати отримане матричне рівняння без структурних змін для дослідження динаміки просторового руху МРО з різними параметрами, зокрема, СБ та БПА.

Розглянемо тепер узагальнені форми математичного моделювання динаміки КБ та суднових кабельних лебідок. Для моделювання динаміки КБ його математична модель повинна бути подана у наступній формі [12]:

$$\begin{cases} \vec{F}_i = \vec{f} \left(\vec{r}_{i-1}, \vec{r}_i, \vec{r}_{i+1}, \frac{d\vec{r}_i}{dt}, L \right); \\ m\ddot{\vec{r}}_i = \vec{F}_i, \end{cases} \quad (2)$$

де \vec{F}_i — вектор рівнодіючої сили, яка діє на елементарну ділянку КБ, $i = 1, 2, \dots, n$; \vec{r}_i — координати елементарної ділянки КБ; L — довжина випущеної частини КБ.

Координати корінного \vec{r}_1 та ходового \vec{r}_n кінців КБ визначаються на основі позиційних кінематичних параметрів МРО, до яких вони під'єднані (СБ та БПА), і є входами ММ КБ. Виходами ММ КБ є сили натягу на корінному \vec{F}_1 та ходовому \vec{F}_n кінцях КБ, які є входними величинами для ММ МРО. Керуючим впливом для ММ КБ є довжина його випущеної частини L .

Застосування ММ КБ у формі (2) дає змогу врахувати взаємний вплив всіх елементів ПБС при моделюванні динаміки його руху, в тому числі при оперативній зміні довжини КБ.

Для моделювання КБ у складі СМК будемо застосовувати метод з автоматичним контролем осьо-

вого руху елементів гнучкого зв'язку, запропонований в [16]. Він об'єднує переваги класичних методів моделювання гнучких зв'язків: забезпечує майже константне значення довжин зв'язків, як сегментний метод, при цьому для його застосування можна використовувати безітеративні методи розв'язку систем диференціальних рівнянь, як у методі зосереджених мас та еластичних зв'язків. Крім того, цей метод на відміну від класичних методів дає змогу моделювати динаміку зміни довжини випущеної частини КБ, що є важливою властивістю для дослідження динаміки ПБС.

Випускання-підбирання КБ моделюється на основі ММ динаміки кабельної лебідки Л [17], яку в згорнутому виді можна представити у виді системи [12]:

$$\begin{cases} M_{EM} = f(u_w, \omega); \\ \dot{\omega} = f(M_{EM}, M_L); \quad M_L = RF_1; \\ \dot{L} = R\omega, \end{cases} \quad (3)$$

де u_w — сигнал керування приводом Л, M_{EM} — рушійний момент електродвигуна Л, ω — кутова швидкість обертання барабана Л, M_L — гальмівний момент на барабані Л, R — радіус барабана Л.

Таким чином, ММ ПБС складається з сукупностей ММ СБ та БПА у формі (1), ММ КБ (2) та ММ Л (3). Параметри кожної ММ можуть відрізнитись в залежності від параметрів відповідних елементів ПБС та прийнятих припущень. Але у цілому використанні форми ММ елементів ПБС дають змогу застосовувати принцип модульності при створенні моделюючих комплексів для дослідження динаміки просторового руху прив'язаних систем.

Узагальнену структуру СМК для дослідження динаміки руху ПБС наведено на рис. 2.

Розглянемо коротко основні принципи організації обчислювального процесу у цій структурі.

Математична модель САК ПБС генерує завдання $Y_{ПБС}$ підводної місії для ПБС: параметри траєкторного руху СБ та БПА, а також завдання щодо законів керування для лебідки Л, яка має забезпечити необхідну довжину випущеної частини КБ, необхідну для успішного виконання місії.

У загальному вигляді множини моделей сигналів керування ПБС мають вигляд:

$$\begin{aligned} Y_{ПБС} &= \{Y_{СБ}; Y_{Л}; Y_{ПБА}\}; \\ \bar{u}_{СБ} &= \{u_{f_{СБ}}; u_{\phi_{СБ}}\}; \quad \bar{u}_{Л} = \{u_w\}; \\ \bar{u}_{ПБА} &= \{u_{\Delta z}; u_{H_{ПБА}}; u_{h_{ПБА}}; u_{\phi_{ПБА}}; u_{\theta_{ПБА}}; u_{\psi_{ПБА}}\}, \end{aligned}$$

де $Y_{СБ}$, $Y_{БПА}$, $Y_{Л}$ — відповідно, завдання керування для САК СБ та САК БПА щодо забезпечення необхідних параметрів їхнього руху для даної підводної місії, а також завдання для роботи лебідки кабель-буксиру,

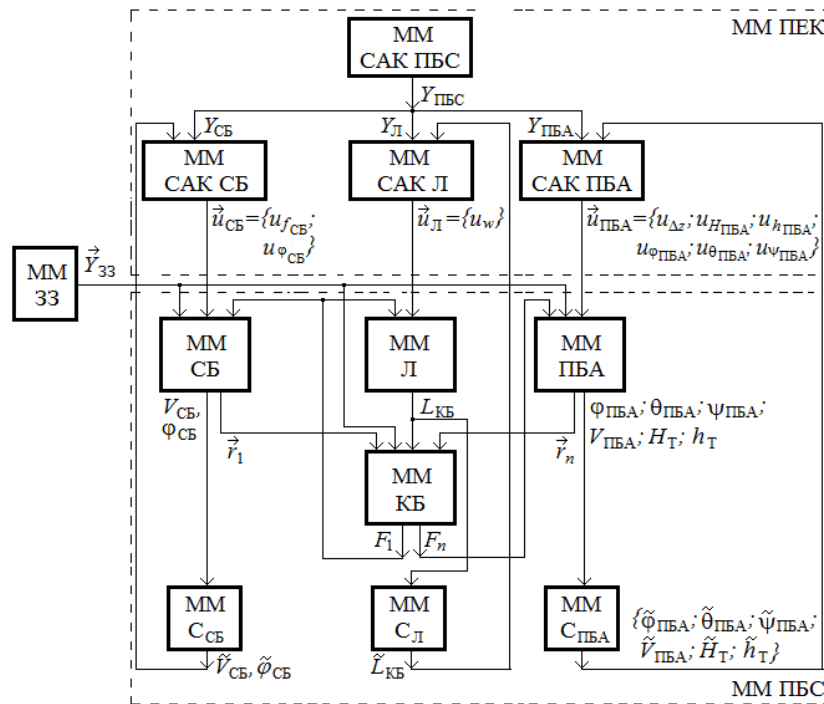


Рис. 2. Узагальнена структура спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження керованої динаміки ПБС

яка має забезпечити відповідну довжину випущеної частини КБ; $\vec{u}_{СБ}$, $\vec{u}_Л$, $\vec{u}_{ПБА}$ — вектори керуючих сигналів для виконавчих механізмів відповідно судна-буксирувальника (сигнал керування упором СБ $u_{f_{СБ}}$ та сигнал керування курсом СБ $u_{\varphi_{СБ}}$), лебідки кабель-буксира (u_w) та БПА (сигнал керування u_{Δ_z} відхиленням БПА від діаметральної площини СБ, сигнали керування глибиною БПА $u_{H_{ПБА}}$ та висотою ходу БПА над ґрунтом $u_{h_{ПБА}}$, а також сигнали керування кутами ризику $u_{\varphi_{ПБА}}$, крену $u_{\theta_{ПБА}}$ та диференту $u_{\psi_{ПБА}}$).

Вихідними змінними математичної моделі СБ (блок «ММ СБ») є фактичні швидкість його руху $V_{СБ}$ та курс $\varphi_{СБ}$, які вимірюються сенсорами $C_{СБ}$ і у вигляді сигналів зворотного зв'язку $\tilde{V}_{СБ}$, $\tilde{\varphi}_{СБ}$ надходять до САК СБ. Математичні моделі сенсорів $C_{СБ}$ враховують похибки вимірювань параметрів руху СБ.

Вихідними змінними математичної моделі БПА (блок «ММ БПА») є його фактичні параметри руху — кути ризику, крену і диференту $\varphi_{БПА}$, $\theta_{БПА}$ і $\psi_{БПА}$, а також похідні від цих величин. Крім того, з метою подальшого використання у САК БПА обчислюються також його лінійна швидкість $V_{БПА}$, глибина занурення $H_{БПА}$ та висота ходу над ґрунтом $h_{БПА}$. Математичні моделі сенсорів $C_{БПА}$ враховують похибки вимірювань параметрів руху БПА $\tilde{\varphi}_{БПА}$, $\tilde{\theta}_{БПА}$, $\tilde{\psi}_{БПА}$, $\tilde{V}_{БПА}$, $\tilde{H}_{БПА}$, $\tilde{h}_{БПА}$.

Вихідними змінними математичної моделі системи «лебідка — кабель-буксир» (блоки «ММ Л») та «ММ КБ») є довжина попущеної частини кабель-буксира $L_{КБ}$, яка обчислюється в САК лебідки, та сили натягу КБ на корінному (\vec{F}_1) та ходовому (\vec{F}_n) його

кінцях, які розраховуються на основі просторових координат цих кінців КБ (змінні \vec{r}_1 і \vec{r}_n від блоків «ММ СБ» і «ММ БПА») та швидкості потоку води, що набігає на КБ (блок ММ 33). Математична модель сенсора $C_{Л}$ враховує похибки вимірювань довжини випущеної частини КБ.

Математична модель зовнішніх збурень (33) містить математичні моделі вітро-хвильових збурень та епюри течії по глибині і генерує вектор сил \vec{Y}_{33} , що діють на корпус СБ (вітро-хвильова дія та дія поверхневої течії) і вектори сил, які діють на КБ та корпус БПА (дія підводної течії).

До основних особливостей роботи моделюючого комплексу належать: можливість дослідження режимів стабілізації плоского і просторового руху БПА в умовах зовнішніх збурень; можливість кількісного дослідження ефективності систем керування ПБС, у тому числі за допомогою моделювання динамічної зміни довжини випущеної частини КБ.

У складі спеціалізованого моделюючого комплексу передбачені наступні типи регуляторів для дослідження систем автоматичного керування (САК) виконавчими механізмами ПБС:

- пропорційний;
- пропорційно-диференціальний;
- пропорційно-інтегрально-диференціальний;
- нечіткий (fuzzy-logic);
- нейромережний (на основі штучних нейронних мереж);
- на основі інверсних математичних і нейромережних моделей динаміки елементів ПБС.

Спеціалізований моделюючий комплекс реалізований у середовищі пакета MatLab і успішно апробований при розв'язку учбово-тренувальних і дослідницьких завдань.

ВИСНОВКИ. 1. Розроблено структуру спеціалізованого моделюючого комплексу підводної буксированої системи у складі «судно-носій — кабельна лебідка — кабель-буксир — буксирований підводний апарат» та синтезовано математичні моделі її складових як основу для комп'ютерного дослідження динаміки та усталених режимів просторового руху

буксированого підводного апарата, у тому числі з можливістю моделювання динамічної зміни довжини випущеної частини кабель-буксира.

2. На основі розробленої структури та математичних моделей елементів підводної буксированої системи створено спеціалізований моделюючий комплекс, який дає змогу досліджувати методом комп'ютерного експерименту керований просторовий рух підводної буксированої системи в умовах дії зовнішніх збурень та перевіряти ефективність роботи систем автоматичного керування таким об'єктом морської техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Егоров В. И.** Подводные буксируемые системы [Текст] : учеб. пособие / В. И. Егоров. — Л. : Судостроение, 1981. — 304 с.
- [2] **Иконников И. Б.** Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести [Текст] / И. Б. Иконников, В. М. Гаврилов, Г. В. Пузырев. — СПб. : Судостроение, 1993. — 224 с.
- [3] Динамика подводных буксируемых систем [Текст] / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин., Д. А. Черненко, Л. С. Астахов. — СПб : Судостроение, 1995. — 200 с.
- [4] **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. — Pp. 1275–1289.
- [5] **Костенко В. В.** Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата [Текст] / В. В. Костенко, И. Г. Макеева // Подводные исследования и робототехника. — 2009. — № 1/7. — С. 22–27.
- [6] **Вельтишев В. В.** Упрощенное представление гибкого кабеля переменной длины для моделирования динамики телеуправляемого подводного комплекса [Текст] / В. В. Вельтишев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». — 2012. — Спец. выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». — С. 32–39.
- [7] **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. — Pp. 185–192.
- [8] Dynamic response of towed line array [Text] / B. K. Yang, K. Q. Zhu, Y. J. Zhu, D. W. Qin // Journal of Hydrodynamics, Ser. B. — 2013. — Vol. 25. — Issue 14. — Pp. 616–619.
- [9] **Park J.** Dynamics modeling of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a towfish towed by a cable [Text] / J. Park, N. Kim // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 7. — Issue 2. — Pp. 409–425.
- [10] Специализированный моделирующий комплекс для исследования эффективности системы управления подводной буксированной системой [Текст] / А. В. Блинцов, Ж. Ю. Бурунина, П. Г. Клименко, Ч. Т. Дык // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. — 2012. — № 1 (442). — С. 92–97.
- [11] **Блинцов О. В.** Моделюючий комплекс для дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «судно-носій — підводний апарат — маніпулятор» [Текст] / О. В. Блинцов, В. А. Надточій // Вісник Національного університету кораблебудування (електронне видання). — 2012. — № 3. — С. 261–266.
- [12] **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. — Pp. 25–36.
- [13] **Лукомский Ю. А.** Навигация и управление движением судов. Учебник. [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — Элмор, 2002. — 360 с.
- [14] **Blintsov O.** Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 1. — Issue 9. — Pp. 4–16.
- [15] **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. — Vol. 4. — Issue 2 (82). — Pp. 42–50.
- [16] **Blintsov O.** Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 1. — Issue 7. — Pp. 4–14.
- [17] **Блинцов О. В.** Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блинцов, В. А. Надточій // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. — 2013. — № 1 (446). — С. 77–82.

© О. В. Блинцов, В. В. Соколов

Надійшла до редколегії 09.06.17

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