



Oleksandr V. Blintsov
Блінцов
Олександр
Володимирович

УДК 629.584

SYNTHESIS OF A SPATIAL MOTION DYNAMICS SIMULATING MODEL OF AN UNMANNED UNDERWATER TOWED SYSTEM AS AN OBJECT OF CONTROL

**СИНТЕЗ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ПРОСТОРОВОГО РУХУ
БЕЗЕКІПАЖНОЇ ПІДВОДНОЇ БУКСИРУВАНОЇ СИСТЕМИ
ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ**

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.13

Oleksandr V. Blintsov

О. В. Блінцов, д-р техн. наук, доц.¹

alex_blintsov@ukr.net

ORC ID: 0000-0003-0426-1219

Volodymyr V. Sokolov

В. В. Соколов, головний інженер,
перший заступник генерального директора²

sokolow@yuzhmash.com

ORC ID: 0000-0002-7015-0464



Volodymyr V. Sokolov
Соколов
Володимир
В'ячеславович

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*State Enterprise «Production Association Southern Machinebuilding Plant
n.a. O. M. Makarov», Dnipro*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний
завод ім. О. М. Макарова», м. Дніпро*

Abstract. The simulating model of an unmanned towed underwater system was synthesized on the basis of mathematical models of a cable winch, a tether-cable and a towed underwater vehicle. The simulating model allows performing computer analysis of the dynamics of spatial motion and the effectiveness of automatic control systems for such objects. The specialized simulating complex based on the synthesized simulating model was developed. It consists of blocks for modeling the dynamics of a towed underwater vehicle, a tether-cable and a cable winch. The model of a towed underwater vehicle consists of mathematical models of the body of the vehicle, hydrodynamic influences, control wings and a bearing surface. The basic law of the dynamics of a towed underwater vehicle is presented in matrix form. It takes into account the six degrees of freedom of the vehicle as a rigid body moving in space in the water flow. Control wings in the number of two pieces are located in the aft part of the towed underwater vehicle and allow changing its roll and pitch angles. This provides a controlled spatial motion of the vehicle in two degrees of freedom - depth and lateral motion. To simulate a tow-cable, a method of modeling a flexible tether with the automatic control of the axial motion of its elements was used which allows taking into account the dynamics of the length change of its released part. The cable winch dynamics model provides modeling of the release and selection of the tether-cable. It contains a mathematical model of the electric motor that drives the cable drum. To assess the reliability of the synthesized simulation model, a complex criterion has been created. It allows assessing the correspondence between the dynamic properties of the model and the real object by comparing the basic kinematic parameters of the vehicle: roll, pitch and depth. By performing full-scale marine experiments, the adequacy of the specialized simulating complex and the authentic character of nonlinear dynamic processes of the spatial motion of the unmanned towed underwater system have been confirmed. The simulation complex allows researching the spatial motion of a towed underwater vehicle in water relative to the towing vessel as an object of control when dynamically changing the length of the released part of the tow-cable.

Keywords: underwater vehicle; towing cable; mathematical model; control system.

Анотація. Синтезовано імітаційну модель безекіпажної буксированої підводної системи на основі математичних моделей кабельної лебідки, кабель-буксира та буксированого підводного апарата. Імітаційна модель дає змогу виконувати комп'ютерне дослідження динаміки просторового руху та ефективності систем автоматичного керування такими об'єктами. Розроблено спеціалізований моделюючий комплекс на базі синтезованої

імітаційної моделі. Він складається з блоків моделювання динаміки буксированого підводного апарата, кабель-буксира та кабельної лебідки. Модель буксированого підводного апарата складається з математичних моделей корпусу апарата, гідродинамічних впливів, керуючих крил та несучої поверхні. Основний закон динаміки буксированого підводного апарата наведено в матричній формі. Він урахує шість ступенів рухливості апарата як твердого тіла, що рухається в просторі в потоці води. Керуючі крила в кількості двох штук розташовані в кормовій частині буксированого підводного апарата і дають змогу змінювати його крен та диферент. Це забезпечує керований просторовий рух апарата за двома степенями вільності: глибиною та боковим зміщенням. Для моделювання кабель-буксира використано метод моделювання гнучкого зв'язку з автоматичним контролем осевого руху його елементів, який дозволяє враховувати динаміку зміни довжини його випущеної частини. Модель динаміки кабельної лебідки забезпечує моделювання випускання та підбирання кабель-буксира. Вона містить математичну модель електричного двигуна, який приводить до руху кабельний барабан. Для оцінки достовірності синтезованої імітаційної моделі сформовано комплексний критерій, який дає змогу оцінити відповідність динамічних властивостей моделі та реального об'єкта шляхом порівняння основних кінематичних параметрів апарата: крену, диференту та глибини. Шляхом проведення морського натурного експерименту підтверджено адекватність спеціалізованого моделюючого комплексу та достовірний характер нелінійних динамічних процесів при просторовому русі безекипажної буксированої підводної системи. Моделюючий комплекс дозволяє досліджувати просторовий рух буксированого підводного апарата як об'єкта керування при динамічній зміні довжини випущеної частини кабель-буксира під впливом набігаючого потоку води.

Ключові слова: підводний апарат; кабель-буксир; математична модель; система керування.

Аннотация. Синтезирована имитационная модель безэкипажной буксируемой подводной системы на основе математических моделей кабельной лебедки, кабеля-буксира и буксируемого подводного аппарата. Имитационная модель позволяет выполнять компьютерное исследование динамики пространственного движения и эффективности систем автоматического управления такими объектами. Разработан специализированный моделирующий комплекс на базе синтезированной имитационной модели. Он состоит из блоков моделирования динамики буксируемого подводного аппарата, кабеля-буксира и кабельной лебедки. Модель буксируемого подводного аппарата состоит из математических моделей корпуса аппарата, гидродинамических воздействий, управляющих крыльев и несущей поверхности. Основной закон динамики буксируемого подводного аппарата представлен в матричной форме. Он учитывает шесть степеней подвижности аппарата как твердого тела, движущегося в пространстве в потоке воды. Управляющие крыла в количестве двух штук расположены в кормовой части буксируемого подводного аппарата и позволяют изменять его крен и дифферент. Это обеспечивает управляемое пространственное движение аппарата по двум степеням свободы: глубине и боковому смещению. Для моделирования кабеля-буксира использован метод моделирования гибкой связи с автоматическим контролем осевого движения её элементов, который позволяет учитывать динамику изменения длины её выпущенной части. Модель динамики кабельной лебедки обеспечивает моделирование выпуска и подбора кабеля-буксира. Она содержит математическую модель электрического двигателя, приводящего в движение кабельный барабан. Для оценки достоверности синтезированной имитационной модели сформирован комплексный критерий, позволяющий оценить соответствие динамических свойств модели и реального объекта путем сравнения основных кинематических параметров аппарата: крена, дифферента и глубины. Путем проведения морского натурного эксперимента подтверждены адекватность специализированного моделирующего комплекса и достоверный характер нелинейных динамических процессов при пространственном движении безэкипажной буксируемой подводной системы. Моделирующий комплекс позволяет исследовать пространственное движение буксируемого подводного аппарата как объекта управления при динамическом изменении длины выпущенной части кабель-буксира под влиянием набегающего потока воды.

Ключевые слова: подводный аппарат; кабель-буксир; математическая модель; система управления.

References

- [1] Yegorov, V. I. (1981). *Podvodnye buksiruemye sistemy: ucheb. posobie* [Underwater towed systems: Study guide]. Leningrad, Sudostroenie Publ.
- [2] Ikonnikov, I. B., Gavrilov, V. M., & Puzyrev, G. V. (1993). *Podvodnye buksiruemye sistemy i bui neytralnoy plavuchesti* [Underwater towed systems and buoys of neutral buoyancy]. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ.
- [3] Poddubnyy, V. I., Shamarin, Yu. Ye., Chernenko, D. A., & Astakhov, L. S. (1995). *Dinamika podvodnykh buksiruemykh sistem* [Dynamics of underwater towed systems]. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ.
- [4] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71-93. doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
- [5] Sarda, E. I., & Dhanak, M. R. (2017). A USV-Based Automated Launch and Recovery System for AUVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42/1, 37-55. doi: 10.1109/JOE.2016.2554679.

- [6] Fang, M. C., Hou, C. S., & Luo, J. H. (2007). On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect. *Ocean Engineering*, 34 (8-9), 1275-1289.
- [7] Kostenko, V. V., & Makeeva, I. G. (2009). 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]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika – Underwater Research and Robotics*, 1 (17), 22-27.
- [8] Veltishev, V. V. (2012). Uproschyonnoe 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. «Mashinostroyeniye», Spets. vyipusk «Spetsialnaya robototekhnika i mehatronika» — Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Mechanical Engineering Series, special issue «Specialized robotics and mechatronics»*, 32-39.
- [9] Srivastava, V. K. (2014). Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (2), 185-192.
- [10] Yang, B. K., Zhu, K. Q., Zhu, Y. J., & Qin, D. W. (2013). Dynamic response of towed line array. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 25 (14), 616-619.
- [11] Park, J., & Kim, N. (2015). Dynamics modeling of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a towfish towed by a cable. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7 (2), 409-425.
- [12] Blintsov, A. V., Burunina, Zh. Yu., Klimenko, P. G., & Dyk, Ch. T. (2012). Spetsializirovannyi modeliruyushchiy 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 korablebuduvannia*, 1 (442), 92-97.
- [13] Blintsov, O. V., & Nadtochii, V. A. (2012). Modeliuiuchy kompleks dlia doslidzhennia dynamiky rukhu pryv'язanoi 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 korablebuduvannia (elektronne vydannia)*, 3, 261-266.
- [14] Dudykevych, V., & Blintsov, O. (2016). Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. *Eureka: Physics and Engineering*, 5, 25-36.
- [15] Lukomskiy, Yu. A., Peshekhonov, V. G., & Skorokhodov, D. A. (2002). *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov*. Uchebnik [Navigation and ship movement control. Study guide.]: Elmor.
- [16] Blintsov, O. (2017). Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/ 9, 4-16.
- [17] Blintsov, O. (2016). 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*, 4/ 2 (82), 42-50.
- [18] Blintsov, O. (2017). 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*, 1/ 7, 4-14.
- [19] Blintsov, O. V., & Nadtochii, V. A. (2013). Sistema avtomatichnoho keruvannia kabelnoi lebidkoiu pryv'язanoi pidvodnoi systemy [Automatic control system for the cable winch of a tethered underwater system]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universitetu korablebuduvannia*, 1 (446), 77-82.
- [20] Voitkunskiy, Ya. Y. (Ed.). (1985). *Spravochnik po teorii korablia*. (T. 1). *Hydromekhanika. Soprotivleniye dvizheniyu sudov*. Sudovyye dvizhytely. Leningrad: Sudostroyeniye.
- [21] Vahushchenko, L. L., & Tsumbal, N. N. (2007). *Sistemu avtomaticheskoho upravleniya dvizheniyem sudna*. 3-e yzd., pererab. y dop. Odessa: Fenyks.

Постановка задачі. Буксировані підводні системи (БПС) широко застосовуються при виконанні морських робіт і мають велику історію розвитку [1–3]. Вони мають ряд переваг у порівнянні з іншими видами підводної робототехніки:

- можливість обстеження великих обсягів водної товщі та значних площ донної поверхні (швидкості буксирування складають 6...12 вузлів);
- можливість комплексного дослідження параметрів водного середовища шляхом установлення на буксирований підводний апарат (БПА) необхідної різноманітної пошукової та дослідницької апаратури;

- можливість оперативної обробки отримуваної інформації про підводне середовище у реальному часі;
- відносна простота конструкції та низька вартість створення БПС у порівнянні із самохідними підводними апаратами-роботами.

До типових підводних завдань для БПС належать:

- вимірювання гідрофізичних та гідрохімічних параметрів водного середовища;
- дослідження рельєфу й структури морського дна, цифрове картографування донної поверхні, виявлення 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 і картографування протяжних інженерних підводних об'єктів (підводних кабелів, трубопроводів тощо).

Особливу актуальність набувають безекіпажні морські системи [4], в тому числі безекіпажні БПС (ББПС) (рис. 1).

Безекіпажні БПС відрізняються від класичних тим, що замість судна забезпечення використовується безекіпажний надводний носій (БНН). Для виконання операцій спуску БПА на воду та підйому БПА на борт БНН без участі людини застосовуються автоматизовані спуско-піднімальні пристрої (СПП) [5]. Керування всіма операціями відбувається дистанційно через модуль цифрового радіозв'язку (МЦР). В іншій структурі ББПС відповідає класичній: кабельна лебідка (КЛ) розташовується на БНН, кабель-буксир (КБ) корінним кінцем закріплюється на КЛ, ходовий кінець КБ закріплюється на БПА.

Безекіпажні БПС мають додаткові переваги у порівнянні з класичними БПС, обумовлені відсутністю людей на борту:

- висока автономність;
- підвищена дальність плавання;
- знижена водотоннажність.

Основною проблемою використання ББПС є автоматизація просторового руху БПА, оскільки як об'єкт керування ББПС являє собою суттєво нелінійний багатовимірний об'єкт, який містить взаємодіючі елементи із зосередженими (БНН та БПА) та розподіленими параметрами (КБ) параметрами.

Задачі дослідження ефективності систем автоматичного керування (САК) ББПС, дослідження властивостей ББПС як об'єкта керування на ранніх етапах проектування доцільно розв'язувати методом математичного моделювання.

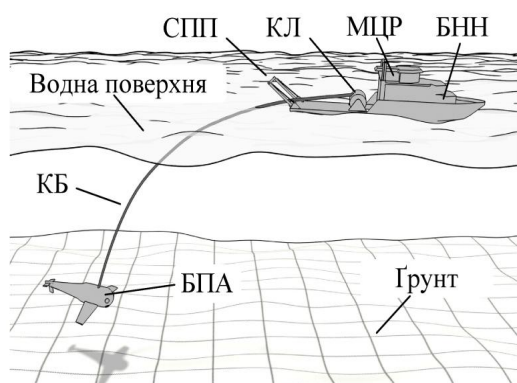


Рис. 1. Безекіпажна буксирована підводна система

Оскільки ББПС як об'єкт керування є суттєво нелінійним і його елементи описуються системами диференціальних рівнянь, які не мають аналітичних розв'язків, то виникає необхідність створення імітаційної моделі ББПС та її реалізації у вигляді комп'ютерної програми — спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Імітаційні моделі просторового руху надводних плавучих засобів та БПА як твердих тіл у потоці води в цілому добре вивчені та 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-буксира.

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, наприклад, у [6] розроблено модель динаміки просторового руху прив'язного підводного апарата. Вплив кабель-троса при цьому моделюється як усталений на основі ітеративного методу стрільби для розв'язання задачі пошуку граничних умов на його кінцях. У роботі [7] розроблено імітаційну модель усталеного руху кабель-троса, яка дає змогу оцінити його вплив на маневреність прив'язного підводного апарата. У роботі [8] пропонується імітаційна 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 лише окремими режимами руху прив'язних підводних систем.

У роботі [9] наведено тривимірну модель гідродинаміки БПС. Головні рівняння КБ складено на основі сегментного методу. Рівняння КБ були апроксимовані з використанням 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'язання задач дослідження САК БПС, необхідно збільшувати кількість сегментів КБ, що суттєво збільшить вимоги до розрахункових ресурсів.

Відомо про моделі БПС, в яких для моделювання КБ застосовується метод зосереджених мас та еластичних зв'язків. Так, у [10] модель КБ з урахуванням ефектів згинання та скручування була використана для моделювання кругового горизонтального маневру буксированої системи. У [11] розроблено модель

напівзаглибного автономного підводного апарата з КБ та гідролокатором бокового огляду. Але застосування таких моделей для БПС з нерозтяжними КБ супроводжується суттєвим збільшенням вимог до розрахункових ресурсів.

Найбільш повно питання імітаційного моделювання та комп'ютерного дослідження руху БПС як об'єкта керування розглянуто в роботах [12; 13]. Проте, у зазначених дослідженнях розглядається лише рух БПА у діаметральній площині судна-буксирувальника. Це не дає можливості оцінювати ефективність САК БПС зокрема при відхиленнях БПА від діаметральної площини судна-буксирувальника по горизонталі та в цілому при дослідженні просторового руху БПА.

Відокремлення невіршених раніше частин загальної проблеми. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що при розробці імітаційних моделей прив'язних підводних систем основну складність становить моделювання взаємодії підводного апарата та гнучкого зв'язку — кабель-троса або кабель-буксира. Тому імітаційні моделі суттєво спрощують за рахунок спрощення моделювання гнучкого зв'язку. Зазвичай для цього застосовують або моделі квазістаціонарного руху гнучкого зв'язку, або моделі динаміки гнучкого зв'язку в плоскій постановці задачі, або грубе моделювання динаміки просторового руху гнучкого зв'язку сегментним методом.

Крім того, адекватність розроблених СМК ґрунтується на адекватності використаних математичних моделей елементів БПС окремо, але в комплексі не підтверджується морським натурним або басейновим експериментом.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ — синтез імітаційної моделі для дослідження динаміки просторового руху безекіпажної буксированої підводної системи як об'єкта керування та перевірка її адекватності шляхом морського натурного експерименту.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні задачі:

- синтезовано імітаційну модель безекіпажної буксированої підводної системи у складі безекіпажного надводного носія, кабельної лебідки, кабель-буксира та буксированого підводного апарата;
- розроблено спеціалізований моделюючий комплекс на базі синтезованої імітаційної моделі;
- перевірено адекватність спеціалізованого моделюючого комплексу шляхом морського натурного експерименту.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Для розв'язання поставлених задач використано наступні методи дослідження: метод моделювання гнучкого

зв'язку на основі автоматичного контролю осьового руху його елементів, метод моделювання числового розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь для обчислення сил реакції зв'язків при моделюванні динаміки кабель-буксира, методи числового розв'язку систем диференціальних рівнянь для математичного моделювання динаміки руху елементів ББПС, метод комп'ютерного моделювання для дослідження динаміки руху ББПС, метод планування та обробки даних морського натурного експерименту для оптимізації параметрів математичної моделі (ММ) підводного апарата.

Об'єктом дослідження є динаміка просторового руху ББПС.

Предмет дослідження — синтез моделі динаміки керованого просторового руху ББПС.

Основний матеріал. Синтез імітаційної моделі будемо виконувати згідно з модульним принципом, запропонованим у [14], на основі структур математичних моделей складових ББПС — елементів із зосередженими та розподіленими параметрами. Елементами із зосередженими параметрами є морські рухомі об'єкти (МРО), які мають властивості твердих, тобто БНН та БПА. Елементом з розподіленими параметрами є КБ.

При моделюванні МРО застосовуються базова система координат (БСК) та зв'язана система координат (ЗСК), їх докладний опис наведено в [15].

Основний закон динаміки просторового руху МРО як твердого тіла має форму системи нелінійних матричних диференціальних рівнянь [16]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_A V}{dt} &= I^{-1} T - KIV ; \\ \frac{d_B R}{dt} &= K_V V + V_s ; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

$$K_v = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix}; \quad K_\omega^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix};$$

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

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 $\vec{F}$ і моментів $\vec{M}$, які діють на МРО; K — матриця, яка враховує переносний рух при взятті похідної по відношенню до ЗСК; 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 $\vec{v}$ і $\vec{\omega}$ на осі ЗСК; $\vec{r}$ та $\vec{q}$ — вектори відповідно поступальних й 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 й в'язкі. Перші враховуються приєднаними масами рідини. Останні зазвичай подають у вигляді суми лінійної та квадратичної залежностей від швидкості руху МРО по відношенню до водного середовища. Рушійні сили та моменти виникають у 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 [17]. На відміну від відомих

форм запису власні маси та моменти інерції МРО M і приєднані маси та моменти інерції рідини Λ зведено в окрему матрицю I . Це дає змогу використовувати отримане матричне рівняння без структурних змін для дослідження динаміки просторового руху МРО з різними параметрами: БНН та БПА.

Розглянемо тепер узагальнені форми математичного моделювання динаміки КБ та судових кабельних лебідок. Для моделювання динаміки КБ його математична модель повинна бути подана у наступному вигляді [14]:

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

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 $\vec{r}_i$ та ходового $\vec{r}_n$ кінців КБ визначаються на основі позиційних кінематичних параметрів МРО, до яких вони під'єднані (БНН 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 вхідними величинами для ММ МРО. Керуючим впливом для ММ КБ є довжина його випущеної частини L .

Застосування ММ КБ у вигляді (2) дозволяє врахувати взаємний вплив усіх елементів ББПС при моделюванні динаміки його руху, в тому числі при оперативній зміні довжини КБ.

Для моделювання КБ у складі СМК будемо використовувати метод з автоматичним контролем осьового руху елементів гнучкого зв'язку, запропонований у [18]. 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 вико-

ристовувати 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 ББПС.

Випускання-підбирання КБ моделюється на основі ММ динаміки кабельної лебідки [19], яку в згорнутому вигляді можна навести у вигляді наступної системи рівнянь [14]:

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

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

Таким чином, імітаційна модель ББПС складається із сукупностей ММ БНН та БПА у вигляді (1), ММ КБ (2) та ММ КЛ (3). Параметри кожної ММ можуть відрізнятися залежно від параметрів відповідних елементів ББПС та прийнятих припущень. Але у цілому використанні форми ММ елементів ББПС дають змогу застосовувати принцип модульності при створенні моделюючих комплексів для дослідження динаміки просторового руху прив'язних систем.

Структуру СМК розробимо з урахуванням особливостей взаємодії елементів ББПС шляхом з'єднання входів та виходів модулів, які моделюють окремі елементи складових ББПС (рис. 2).

Розглянемо порядок організації обчислювального процесу в цій структурі. Математична модель БПА складається з основного закону динаміки та математичних моделей гідродинамічних впливів (ГДВ), несучої поверхні (НП), керуючих крил (КК), впливу сил тяжіння та плавучості (СТП). Математичні моделі перелічених елементів докладно описані в довідковій літературі [20].

Моделюватимемо БПА, обладнаний горизонтальною несучою поверхнею та двома керуючими крилами. При цьому НП розташовуються так, щоб рівнодіюча сил, які вона створює, компенсувала вертикальну складову збурюючої сили від КБ, а КК розташовуються в кормовій частині БПА, що надає можливість створювати керований диферентуючий момент. Керуючим впливом для БПА є вектор-рядок $\bar{u}$:

$$\bar{u} = u_{left}, u_{right}; u_{left} \in [-1, 1]; u_{right} \in [-1, 1],$$

де u_{left} — сигнал керування для лівого керуючого крила; u_{right} — сигнал керування правого керуючого крила.

При цьому при $u_{left} = u_{right}$ крен БПА дорівнюватиме нулю і керованою буде лише глибина БПА за рахунок зміни диференту БПА, останній у цьому випадку керується синхронною зміною керуючих впливів для лівого та правого крил. Якщо $u_{left} \neq u_{right}$, то

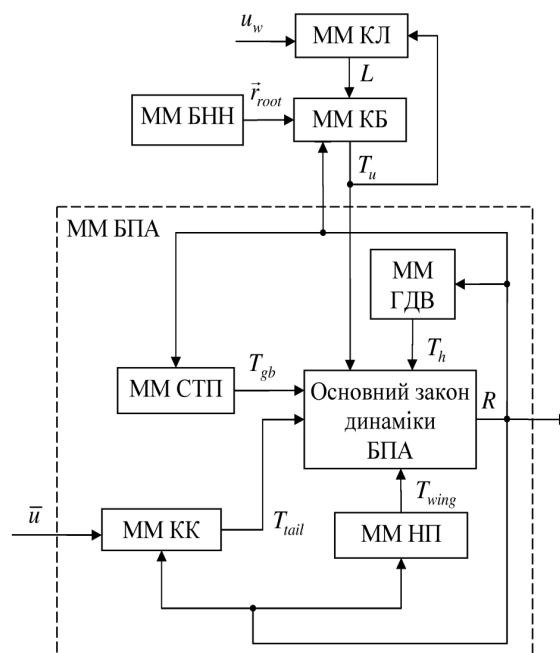


Рис. 2. Узагальнена структура спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження динаміки просторового руху ББПС

з'явиться крен і БПА зміщуватиметься вбік. Таким чином забезпечуються два керовані степені вільності: вертикальне та бокове переміщення БПА.

Для повороту КК застосовується автоматизований електропривід, тому динаміку повороту КК відносно корпусу БПА моделюватимемо за допомоги задавача інтенсивності першого порядку:

$$\frac{du_{out}}{dt} = \frac{1}{T_{int}} \text{sat}(\varepsilon, \varepsilon_s);$$

$$\varepsilon = u_{in} - u_{out}; \quad \text{sat}(\varepsilon, \varepsilon_s) = \begin{cases} \varepsilon_s, & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_s; \\ -\varepsilon_s, & \text{при } \varepsilon < -\varepsilon_s; \\ \varepsilon, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$\alpha_{left, right} = Ku_{out(left), out(right)}, K < 0,$$

де u_{in} — параметр, який потрапляє на вхід задавача інтенсивності, u_{out} — вихідне значення задавача інтенсивності; ε — сигнал неузгодженості параметрів u_{in} та u_{out} ; ε_s — параметр, який визначає поріг насичення сигналу неузгодженості ε ; T_{int} — стала часу, яка визначає динаміку перехідного процесу при виході параметра ε з режиму насичення; $\text{sat}(\varepsilon, \varepsilon_s)$ — функція, яка реалізує нелінійний елемент з характеристикою типу «насичення»; $\alpha_{left, right}$ — відповідно кути повороту лівого й правого КК відносно корпусу БПА; K — коефіцієнт масштабування керуючого впливу, оскільки параметри u_{left} , u_{right} безрозмірні, то коефіцієнт K має кутову розмірність; $u_{out(left)}$, $u_{out(right)}$ — виходи задавачів інтенсивності відповідно для лівого та правого КК.

При від'ємних значеннях u_{left} , u_{right} кути α_{left} , α_{right} мають додатні значення, що створюватиме диферент на ніс БПА і змушуватиме його заглиблюватися, відповідно, при додатних значеннях керуючих впливів БПА отримуватиме диферент на корму і буде спливати. Такий вибір знака коефіцієнта K зроблено з урахуванням того, що кінцевим керованим параметром є поступальне переміщення БПА вздовж вертикальної осі БСК, направленої вгору, і знаки керуючих впливів (за рівності їх абсолютних значень) відповідатимуть напрямку руху БПА вздовж вертикальної осі обраної системи координат.

Якщо $u_{left} > u_{right}$, то $\alpha_{left} < \alpha_{right}$, у зв'язку із цим БПА отримуватиме крен на лівий борт, це, відповідно, спричинятиме його переміщення вправо, і навпаки, якщо $u_{left} < u_{right}$, то $\alpha_{left} > \alpha_{right}$, у зв'язку із цим БПА отримуватиме крен на правий борт, це, відповідно, спричинятиме його переміщення вліво. Такі переміщення пояснюються тим, що «підйомна сила» несучої поверхні спрямована вниз.

Елементи матриці сил та моментів T , тобто вектори $\vec{F}$ та $\vec{M}$, утворюються за принципом суперпозицій [21]:

$$T = T_h + T_{gb} + T_{wing} + T_{tail} + T_u;$$

де T_h — матриця гідродинамічних (в'язких) сил та моментів; T_{gb} — матриця сил та моментів тяжіння і плавучості; T_{wing} — матриця сил та моментів НП; T_{tail} — матриця сил та моментів ХО; T_u — матриця сил та моментів КБ.

Усі елементи цих матриць задаються в проекціях на осі ЗСК.

При виконанні підводних робіт БНН рухається або прямолінійно, або за деякою заданою траєкторією. У задачах дослідження САК рухом БПА, які розглядаються в статті, немає необхідності моделювати БНН. Достатньо задавати у функції часу t координати корінного кінця КБ, закріпленого на БНН, у вигляді радіус-вектора $\vec{r}_{root}(t)$, який з'єднає початок БСК та точку кріплення корінного кінця КБ на БНН. Власне таку задачу і виконує ММ БНН.

На вхід імітаційної моделі ББПС у ролі керуючого впливу також надходить параметр u_w , який являє собою керуючий вплив для електроприводу КЛ. При $u_w > 0$ кабельна лебідка випускає КБ і довжина його випущеної частини L збільшується. Відповідно, при $u_w < 0$ параметр L зменшується, а при $u_w = 0$ — не змінюється.

Динаміка зміни довжини КБ обчислюється в ММ КЛ, а динаміка руху КБ обчислюється в ММ КБ.

Спеціалізований моделюючий комплекс реалізовано в середовищі Simulink пакета Matlab.

Перевірку адекватності синтезованої імітаційної моделі та розробленого на її основі СМК здійснено шляхом проведення морських натурних випробувань макету БПА проекту «Планер-2» виробництва Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна, м. Миколаїв).

Метою експерименту було визначення характеру динаміки руху БПА. Адекватність імітаційної моделі оцінювалася шляхом порівняння динамічних властивостей БПА та його імітаційної моделі при різних швидкостях буксирування. Порівнювалися основні кінематичні параметри БПА: крен θ , диферент ψ та глибина y . Експеримент проводився в два етапи:

1) проведення морських натурних випробувань БПА зі зберіганням залежностей $\theta(t)$, $\psi(t)$ та $y(t)$;

2) налаштування параметрів імітаційної моделі для забезпечення задовільного збігу динамічних властивостей БПА.

Після проведення морських натурних випробувань параметри імітаційної моделі налаштовувалися (оптимізувалися) таким чином, щоб задовольняти наступному комплексному критерію G :

$$G = E_y < 15\% \wedge E_\theta < 15\% \wedge E_\psi < 15\% \wedge J_y < 10\% \wedge J_\theta < 10\% \wedge J_\psi < 10\% \quad (4)$$

$$E_y = \frac{100\%}{y_{\max}} \max |y_r(t) - y_m(t, \beta)|;$$

$$J_y = \frac{100\%}{t_s y_{\max}} \int_0^{t_s} |y_r(t) - y_m(t, \beta)| dt; \quad (5)$$

$$E_\theta = \frac{100\%}{\theta_{\max}} \max |\theta_r(t) - \theta_m(t, \beta)|;$$

$$J_\theta = \frac{100\%}{t_s \theta_{\max}} \int_0^{t_s} |\theta_r(t) - \theta_m(t, \beta)| dt; \quad (6)$$

$$E_\psi = \frac{100\%}{\psi_{\max}} \max |\psi_r(t) - \psi_m(t, \beta)|;$$

$$J_\psi = \frac{100\%}{t_s \psi_{\max}} \int_0^{t_s} |\psi_r(t) - \psi_m(t, \beta)| dt; \quad (7)$$

де β — вектор параметрів імітаційної моделі БПА, які оптимізуються; $E_{y, \theta, \psi}$ — максимальні відносні нев'язки між експериментальними даними та даними імітаційного моделювання; $J_{y, \theta, \psi}$ — функціонали, які дають змогу оцінити адекватність імітаційної моделі БПА; t_s — момент часу, в який завершується перехідний процес; y_r, θ_r, ψ_r — експериментальні значення відповідно глибини, крену та диференту БПА; y_m, θ_m, ψ_m — змодельовані значення відповідно глибини, крену й диференту БПА; $y_{\max}, \theta_{\max}, \psi_{\max}$ — граничні значення відповідно глибини, крену та диференту БПА.

Функціонали $J_{y, \theta, \psi}$ являють собою відносні оцінки математичного очікування абсолютних значень нев'язок експериментальних та змодельованих значень кінематичних параметрів БПА. Модулі нев'язок як основні параметри при розрахунку функціоналів $J_{y, \theta, \psi}$ обрано через те, що критерій $G(\beta)$ не передбачає їх мінімізацію, оскільки БПА є багатовимірним суттєво нелінійним об'єктом і мінімізація одного з функціоналів може спричинити недопустиме збільшення інших. Натомість 10%-й поріг для функціоналів $J_{y, \theta, \psi}$ забезпечить достатню точність для імітаційної моделі такої складності і забезпечить її адекватність. Зменшувати поріг у даному випадку немає необхідності, оскільки імітаційна модель має забезпечувати достовірний характер нелінійних динамічних процесів при просторовому русі БПА.

Максимальна проектна глибина БПА складає 30 м, тому $y_{\max} = 30$ м. У номінальних режимах руху диферент БПА не перевищує $\pm 45^\circ$, тому $\psi_{\max} = 90^\circ$, крен БПА не перевищує $\pm 90^\circ$, тому $\theta_{\max} = 180^\circ$.

Морський натурний експеримент проводився за швидкостей буксирування $v_{\text{tow}} = 2$ та $v_{\text{tow}} = 3$ м/с.

Спочатку необхідно було визначити наступні параметри:

— $t_{y_{\max}}$ — тривалість занурення БПА з початкового положення $y \approx -5$ м до $y = -y_{\max}$;

— $t_{\theta_{\max}}$ — тривалість зміни крену БПА від початкового положення $\theta \approx 0^\circ$ до $\theta \approx \pm 90^\circ$.

У результаті експерименту було встановлено, що $t_{y_{\max}}$ складає приблизно 35 с при $v_{\text{tow}} = 2$ та 70 с при $v_{\text{tow}} = 3$ м/с, $t_{\theta_{\max}}$ складає приблизно 6 с при $v_{\text{tow}} = 2$ та 4 с при $v_{\text{tow}} = 3$ м/с.

Далі необхідно було отримати експериментальні значення залежностей $\theta(t)$, $\psi(t)$ та $y(t)$. Керуючий вплив при цьому задавався у вигляді меандру:

$$u = -\text{sgn} \left[\sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right];$$

$$u_{\text{left}} = u_{\text{right}},$$

де T — період меандру; $\text{sgn}()$ — функція сігнум.

Для отримання залежностей $\psi(t)$ та $y(t)$ керуючі впливи лівого та правого КК повинні бути однакові: $u_{\text{left}} = u_{\text{right}}$. При цьому параметр T обирається виходячи з того, що керуючий вплив на заглиблення повинен подаватися стільки часу, щоб БПА досяг глибини $u_{\max}$, тобто $T = 2t_{y_{\max}}$.

Аналогічним чином обирався параметр T для отримання залежності $\theta(t)$ — керуючий вплив повинен подаватися стільки часу, щоб БПА змінив крен з одного борту на інший, тобто $T = 2t_{\theta_{\max}}$. При цьому значення керуючих впливів для лівого та правого КК повинні мати різні знаки: $-u_{\text{left}} = u_{\text{right}}$.

Загальна тривалість буксирування t_{tow} обиралася так, щоб БПА виконав 5 циклів «занурення–спливання» та 5 циклів зміни крену з одного борту на інший, тобто $t_{\text{tow}} = 5T$. Умови буксирування зведено в табл. 1.

Після завершення морського натурного експерименту та отримання залежностей $\theta_r(t)$, $\psi_r(t)$ та $y_r(t)$ було проведено імітаційне моделювання та налаштовано параметри ММ ББПС (табл. 2).

Таблиця 1. Умови буксирування БПА

Параметр	Умова 1	Умова 2
Швидкість буксирування v_{tow} , м/с	2	3
Період сигналу керування (меандру) T для визначення залежностей $\psi(t)$ та $y(t)$, с	70	140
Загальна тривалість буксирування t_{tow} для визначення залежностей $\psi(t)$ та $y(t)$, с	350	700
Період сигналу керування (меандру) T для визначення залежності $\theta(t)$, с	6	4
Загальна тривалість буксирування t_{tow} для визначення залежності $\theta(t)$, с	30	20

Таблиця 2. Оптимізовані параметри ММ ББПС

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Корпус БПА (трьохосовий еліпсоїд)		
Довжина l_1	м	0,75
Ширина l_2	м	0,3
Висота l_3	м	0,2
Густина води ρ	кг/м ³	1024
Водотоннажність V_{dis}	м ³	0,024
Маса m	кг	24,1
Площа поверхні $S_{ПА}$	м ²	0,46
Площі проекцій на площини ЗСК:		
– поперечну $S_{ПАx}$	м ²	0,047
– горизонтальну $S_{ПАy}$	м ²	0,177
– діаметральну $S_{ПАz}$	м ²	0,118
Гідродинамічні коефіцієнти:		
– $\{k_{Fx}, k_{Fy}, k_{Fz}\}$	–	{3,1, 3,5, 3,4}
– $\{k_{Mx}, k_{My}, k_{Mz}\}$	–	{0,25, 0,5, 0,5}
Несуча поверхня		
Профіль	–	CLARK-Y
Форма в плані	–	Прямокутна
Розмах $a_{НП}$	м	0,5
Хорда $b_{НП}$	м	0,25
Точка прикладення рівнодіючої сили в ЗСК $R_{НП}$	{м, м, м}	{0,2, 0, 0}
Максимальний гідродинамічний коефіцієнт підйомної сили $C_{НПx}$ (при куті атаки 15°)	–	1,38
Гідродинамічний коефіцієнт лобового опору $C_{НПy}$ (при куті атаки 15°)	–	0,13
Керуюче крило		
Профіль	–	NACA 0012
Форма в плані	–	Прямокутна
Розмах $a_{КК}$	м	0,20
Хорда $b_{КК}$	м	0,15
Точка прикладення рівнодіючої сили в ЗСК:	{м, м, м}	
– ліве $R_{ККл}$		{–0,38, 0, –0,2}
– праве $R_{ККп}$		{–0,38, 0, –0,2}
Максимальний гідродинамічний коефіцієнт підйомної сили СККх (при куті атаки 15°)	–	1,2
Гідродинамічний коефіцієнт лобового опору СККу (при куті атаки 15°)	–	0,098
Кабель-буксир		
Довжина $L_{КБ}$	м	50
Діаметр D	мм	6
Коефіцієнти гідродинамічного опору:		
– нормальний C_n	–	1,0
– тангенціальний C_t	–	0,1
Точка кріплення ходового кінця КБ у ЗСК $R_{КБ}$	{м, м, м}	{0,23, 0,1, 0}

Результати морського натурного експерименту та імітаційного моделювання з оптимізованими параметрами ММ ББПА подано на рис. 3–8.

Як бачимо, імітаційна модель БПА забезпечує достовірний характер нелінійних динамічних процесів при просторовому русі БПА. Результати обчислення складових критерію G за формулами (5)–(7) зведені в табл. 3.

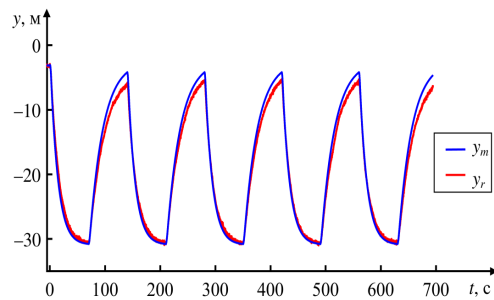


Рис. 3. Динаміка «заглиблення–спливання» БПА при $v_{tow} = 2$ м/с

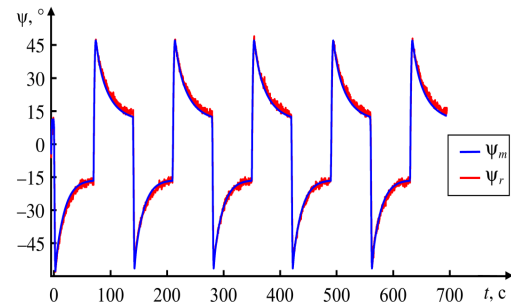


Рис. 4. Динаміка зміни диференту БПА при $v_{tow} = 2$ м/с

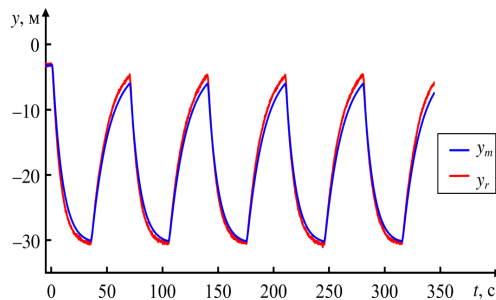


Рис. 5. Динаміка «заглиблення–спливання» БПА при $v_{tow} = 3$ м/с

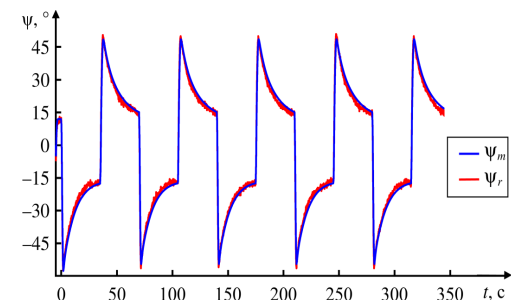


Рис. 6. Динаміка зміни диференту БПА при $v_{tow} = 3$ м/с

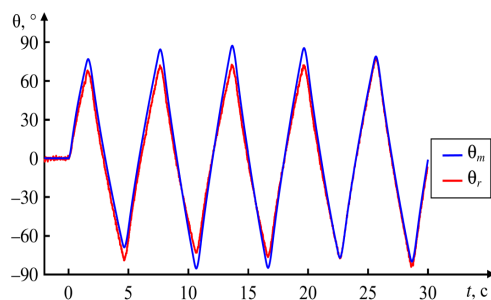


Рис. 7. Динаміка зміни крену БПА при $v_{tow} = 2$ м/с

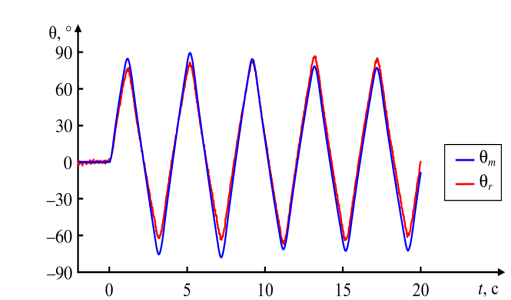


Рис. 8. Динаміка зміни крену БПА при $v_{tow} = 3$ м/с

Таблиця 3. Числові значення складових критерію G

Критерій, %	Умова 1	Умова 2
E_y	8,04	7,40
J_y	3,14	3,32
E_ψ	10,25	9,22
J_ψ	1,33	1,69
E_θ	9,58	9,62
J_θ	3,07	3,26

Якщо підставити отримані значення у формулу (4), то отримаємо $G = \text{true}$ за різних швидкостей буксирування (2 та 3 м/с), що підтверджує адекватність синтезованої імітаційної моделі ББПС.

Обговорення отриманих результатів. Розроблений СМК дає змогу досліджувати динаміку просторового руху ББПС, у тому числі досліджувати ефективність систем автоматичного керування просторовим рухом ББПС без проведення складних,

тривалих та дорогих басейнових або морських натурних випробувань.

Отримані результати становлять наукову цінність для розвитку досліджень у сфері морської робототехніки, зокрема в задачах дослідження руху прив'язаних підводних систем, оскільки дають змогу досліджувати динаміку просторового руху БПА з урахуванням динаміки гнучкого зв'язку економічно ефективним методом комп'ютерного моделювання. Синтезована імітаційна модель може використовуватися для оцінки технічних характеристик складових ББПС на стадії їх проектування, а також для синтезу систем автоматичного керування їх рухом у разі застосування методів синтезу, які передбачають наявність математичної моделі об'єкта керування.

ВИСНОВКИ. 1. Синтезовано імітаційну модель безпечної буксированої підводної системи на осно-

ві математичних моделей кабельної лебідки, кабель-буксира та буксированого підводного апарата, яка є основою для комп'ютерного дослідження динаміки просторового руху буксированого підводного апарата.

2. Розроблено спеціалізований моделюючий комплекс на базі синтезованої імітаційної моделі, який дає змогу досліджувати методом комп'ютерного експерименту керований просторовий рух безекіпажної буксированого підводної системи та досліджувати ефективність роботи систем автоматичного керування таким об'єктом морської техніки.

3. Шляхом проведення морського натурного експерименту підтверджено адекватність спеціалізованого моделюючого комплексу та достовірний

характер нелінійних динамічних процесів при просторовому русі безекіпажної буксированого підводної системи. Максимальні значення нев'язок кінематичних параметрів, отриманих у результаті морського експерименту та імітаційного моделювання, не перевищує 10,25 %, відносні оцінки математичного очікування абсолютних значень нев'язок експериментальних та змодельованих значень кінематичних параметрів не перевищують 3,32 %. Отриманий результат є цілком достатнім для імітаційної моделі такої складності та дає змогу застосовувати синтезовану імітаційну модель для дослідження динаміки просторового руху безекіпажної буксированого підводної системи.

Список літератури

- [1] Егоров, В. И. (1981). *Подводные буксируемые системы*: учеб. пособие. Ленинград: Судостроение.
- [2] Иконников, И. Б., Гаврилов, В. М., & Пузырев, Г. В. (1993). *Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести*. Санкт-Петербург: Судостроение.
- [3] Поддубный, В. И., Шамарин, Ю. Е., Черненко, Д. А., & Астахов, Л. С. (1995). *Динамика подводных буксируемых систем*. Санкт-Петербург: Судостроение.
- [4] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71-93. doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
- [5] Sarda, E. I., & Dhanak, M. R. (2017). A USV-Based Automated Launch and Recovery System for AUVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42/1, 37-55. doi: 10.1109/JOE.2016.2554679.
- [6] Fang, M. C., Hou, C. S., & Luo, J. H. (2007). On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect. *Ocean Engineering*, 34 (8-9), 1275-1289.
- [7] Костенко, В. В., & Макеева, И. Г. (2009). Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата. *Подводные исследования и робототехника*, 1/7, 22-27.
- [8] Вельтищев, В. В. (2012). Упрощенное представление гибкого кабеля переменной длины для моделирования динамики телеуправляемого подводного комплекса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», Спец. выпуск «Специальная робототехника и мехатроника»*, 32-39.
- [9] Srivastava, V. K. (2014). Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (2), 185-192.
- [10] Yang, B. K., Zhu, K. Q., Zhu, Y. J., & Qin, D. W. (2013). Dynamic response of towed line array. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 25 (14), 616-619.
- [11] Park, J., & Kim, N. (2015). Dynamics modeling of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a towfish towed by a cable. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7 (2), 409-425.
- [12] Блинцов, А. В., Бурунина, Ж. Ю., Клименко, П. Г., & Дык, Ч. Т. (2012). Специализированный моделирующий комплекс для исследования эффективности системы управления подводной буксируемой системой. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*, 1 (442), 92-97.
- [13] Блинцов, О. В., & Надточій, В. А. (2012). Моделирующий комплекс для дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «судно-носії – підводний апарат-маніпулятор». *Вісник Національного університету кораблебудування (електронне видання)*, 3, 261-266.
- [14] Dudykevych, V., & Blintsov, O. (2016). Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. *Eureka: Physics and Engineering*, 5, 25-36.
- [15] Лукомский, Ю. А., Пешехонов, В. Г., & Скороходов, Д. А. (2002). *Навигация и управление движением судов*. Учебник. Элмор.
- [16] Blintsov, O. (2017). Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/ 9, 4-16.
- [17] Blintsov, O. (2016). 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*, 4/ 2 (82), 42-50.
- [18] Blintsov, O. (2017). 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*, 1/ 7, 4-14.
- [19] Блинцов, О. В. & Надточій, В. А. (2013). Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*, 1 (446), 77-82.

- [20] Войткунский, Я. И. (Ред.). (1985). *Справочник по теории корабля*. (Т. 1). Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Ленинград: Судостроение.
- [21] Вагущенко, Л. Л., & Цымбал, Н. Н. (2007). *Системы автоматического управления движением судна*. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Феникс.

© О. В. Блінцов, В. В. Соколов
Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов