

УДК 681.5:629.58;
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.2\(495\).9](https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).9)

INCREASING THE ACCURACY OF THE SPEED MOTION STABILIZATION OF AN AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE DURING TRAJECTORY MOTION

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ РУХУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕННОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ПРИ ТРАЄКТОРНОМУ РУСІ

Hanna S. Hrudinina
hanna.hrudinina@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8298-9251

Г. С. Грудініна,
канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. This work aims to determine the relevance of developing a high-precision control system for an autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV) of a small class.

Method. The paper proposes the use of mathematical modeling methods for the spatial movement of an underwater vehicle, taking into account the hydrodynamic characteristics of the propulsion and steering device (PSD). The movement of the AUUV is considered according to the laws of solid body mechanics in a three-dimensional space with six degrees of freedom. Three of them characterise linear movements of the center of mass, and the other three – rotation of a rigid body relative to the center of mass.

Mathematical modeling of the dynamics of the AUUV includes the transformation of the coordinates of the vectors used in the mathematical models of its component elements between the bases of the coordinate system at each iteration of the calculation. The relevance of the type of propulsion and steering device chosen for research is proven by the analysis of autonomous underwater vehicles currently produced by various global manufacturers presented in the work.

Results. The paper presents the classification of autonomous unmanned underwater vehicles by mass and hull design. According to the review of the missions performed using these devices, the need to solve the problem of increasing the stabilization speed system accuracy of movement of the AUUV was emphasized. The dependence of hydrodynamic forces and moments on the geometric, kinematic and structural characteristics of the PSD was determined using CFD modeling.

Scientific novelty. The work proposes using mathematical models of the AUUV control elements to synthesise the vehicle's automatic speed control system. Namely, the propulsion and steering device system consists of a direct current motor, a shaft guide, and a propeller in a guide or rotary nozzle. Using numerical modeling, to study of a propeller thrust force at different speeds and attack angles of the flow was carried out.

Practical importance. The type of PSD chosen in the work is the most common in the small class of devices, which is the most applicable, both for scientific and industrial needs. Different types of engines from the Tecnydyne company were used in the study. The engines of this company are used for underwater vehicles currently manufactured in Ukraine.

Key words: mathematical modeling; propulsion and steering device; computational hydrodynamics; autonomous unmanned underwater vehicle; rotary screw column.

Анотація. Мета. Метою даної роботи є визначення актуальності синтезу системи керування підвищеної точності для автономного ненаселеного підводного апарату (АНПА) малого класу.

Методика. В роботі пропонується застосування методів математичного моделювання просторового руху підводного апарата, з урахуванням гідродинамічних характеристик рушійно-кермового пристрою (РКП). Рух АНПА розглядається відповідно до законів механіки твердого тіла в тривимірному просторі з шістьма ступенями свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центра маси, інші три – обертання твердого тіла відносно центра маси. Математичне моделювання динаміки АНПА включає перетворення координат векторів, які використовуються у математичних моделях його складових елементів, між базисами системи координат на кожній ітерації обчислення.

Результати. Обґрунтовано вибір, обраного для дослідження типу рушійно-кермового пристрою, представленим в роботі аналізом автономних підводних апаратів, що виробляються на даний час різними світовими виробниками. В роботі представлено класифікацію автономних ненаселених підводних апаратів за масою та конструкцією корпусу. За проведенням оглядом місій, що виконують за допомогою даних апаратів, підкреслено необхідність вирішення завдання підвищення точності стабілізації швидкості руху АНПА. Засобами CFD моделювання визначені залежності гідродинамічних сил та моментів від геометричних, кінематичних та конструктивних характеристик РКП.

Наукова новизна. В роботі запропоновано використання математичних моделей елементів органів керування АНПА, для синтезу системи автоматичного керування швидкістю руху апарата. А саме, системи рушійно-кермового пристрою, що складається з двигуна постійного струму, валопроводу, гребного гвинта в напрямній або поворотній насадці. Для створення достовірної математичної моделі динаміки АБПА з конкретним РКП фірми Tecnapdune, було застосовано CFD-моделювання з розробкою 3D моделі рушії в CAD SolidWorks.

Практична значимість. Обраний в роботі тип РКП є найбільш поширеним в малому класі апаратів, який є найбільш застосованим, як для наукових, так і виробничих потреб. В дослідженні використано рушії різних типів від компанії Tecnapdune. Рушії даної фірми використовуються для підводних апаратів, що виготовляються в Україні на даний час.

Ключові слова: математичне моделювання; рушійно-кермовий пристрій; обчислювальна гідродинаміка; автономний ненаселений підводний апарат; поворотна гвинтова колонка.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Провести огляд найбільш відомих світових виробників автономних ненаселених підводних апаратів з метою визначення практичного застосування апаратів різних класів. Проаналізувати органи руху та керування, що використовують для підвищення маневреності у сучасних підводних апаратах. Обґрунтувати необхідність підвищення точності керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата (АНПА) шляхом стабілізації упору гребного гвинта в насадці. Розглянути математичну модель просторового руху АНПА та елементів рушійно-кермового пристрою. Провести визначення залежності гідродинамічних сил та моментів, що діють на елементи ізольованого рушійно-кермового пристрою фірми Tecnapdune [1] від геометричних, кінематичних та конструктивних характеристик при експлуатації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На думку авторів роботи [2], забезпечення автономності, маневреності та організації керування рухом вздовж складних траєкторій підводного апарата є складною науково-дослідницькою та інженерною задачею, вирішення якої потребує знання поведінки апарата у середовищі та впливу середовища на динаміку апарата. Багатофункціональний підводний апарат повинен мати здатність виконувати швидкі та точні маневри, що вимагає розробки оптимальних алгоритмів керування та оптимізації характеристик апарата для досягнення високої маневреності. Досягнення даної мети вимагає розробки алгоритмів, які б забезпечували точність руху апарата в умовах обмеженого простору та відсутності прямого контакту з оператором.

В роботі [3], представлені експериментальні результати для перевірки продуктивності нелінійного

керування, яке включає ПД-регулятор для відстеження траєкторії положення та орієнтації АНПА. Піднімається питання підвищення точності керування АНПА під час занурення апарата, де неможливе використання GPS навігації. Авторами роботи [4] пропонуються алгоритми для підвищення точності роботи власної навігаційної системи АНПА. Дана система складається з інерціальної навігаційної платформи, доплерівського лага (DL) та алгоритму оцінки.

В роботі [5] автори акцентують увагу на необхідності модельного аналізу гідродинамічних характеристик запропонованого рушійно-кермового пристрою перед встановленням на апарат. Головною проблемою автономних апаратів є час автономної роботи, який пов'язаний з ефективністю використання енергії батареї. На даний час активно розглядається питання використання гібридних повітрянезалежних систем живлення АНПА.

Однак, покращення енергоефективності АНПА можливо також, шляхом оптимізації роботи рушійної системи. Використання числового моделювання гідродинамічних характеристик рушіїв у суцільному потоці може бути корисним інструментом для отримання необхідних параметрів налаштування системи [6].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Система стабілізації швидкості руху АНПА є важливою частиною інтегрованої навігаційної системи керування траєкторним рухом підводного апарата в стані занурення. За проведенням аналізом літератури можна відзначити, що питання підвищення точності траєкторного руху автономних підводних апаратів широко обговорюється, та пропонуються різні способи підвищення якості керування. Одним з варіантів вирішення завдання стабілізації швидкості руху апарата є підвищення точності керування з урахуванням

уточненого значення упору гребного гвинта при роботі в косому потоці води. Для вирішення даного завдання необхідно дослідити гідродинамічні характеристики рушійної системи засобами чисельного моделювання. Використання математичної моделі, розробленої в системі Simulink, дозволить враховувати динаміку просторового руху апарата. Застосування CFD-моделей обраного типу РКП надає можливість урахувати вплив течії на гідродинамічні характеристики рушійної системи.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Оґрунтування необхідності підвищення точності роботи системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата з використанням числового моделювання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі пропонується застосування методів математичного моделювання просторового руху підводного апарата, з урахуванням гідродинамічних характеристик рушійно-кормового пристрою (РКП). Математичне моделювання динаміки АНПА включає перетворення координат векторів, які використовуються у математичних моделях його складових елементів, між базисами системи координат на кожній ітерації обчислення. Перетворення координат виконується за допомогою матричного рівняння зв'язку, шляхом обчислення оберненої матриці.

В роботі застосовано засоби CFD моделювання для визначення залежності гідродинамічних сил та моментів, що діють на елементи рушійно-кормового пристрою фірми Tecnapdyne, від геометричних, кінематичних та конструктивних характеристик в суцільному потоці води. З цією метою, в CAD Solid Works побудовано 3D модель гребного гвинта, насадки та приводу з певним набором функціональних параметрів, що визначають форму контуру та профільних перерізів лопатей.

Об'єктом дослідження є рушійно-кормовий пристрій автономного підводного апарата малого класу.

Предметом дослідження є стабілізація швидкості руху АНПА шляхом використання уточненого значення упору РКП.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Огляд найбільш відомих світових виробників автономних ненаселених підводних апаратів

Зазвичай, велика кількість АНПА має гвинт, який розміщений у відповідному положенні для маневрування в потрібному напрямку. Для одnogвинтових АНПА, гвинт розташований у кормовій частині, а напрямок руху контролюється за допомогою крил, розташованих у кормовій частині. Найбільш поширеним типом рушійно-кормового пристрою для АНПА *малого та середнього* класів є гребний гвинт або гвинт в напрямній насадці, розташований співвісно зв'язаній системі координат, вектор упору якого проходить через центр маси апарата, рис. 1. До них належать АНПА від світових виробників, таких як Anduril, Atlas elektronik, Bedrock, Deepinfar, Edgelab SRL, Huntington ingalls industries, Kongsberg maritime, International submarine engineering Ltd та інші, [7-17]. Такі АНПА, як правило мають обтічну, частіше торпедоподібну форму, рушійна система яких складається з двигуна постійного струму, гребного гвинта та гідродинамічних плавників які забезпечують рух та маневреність апарату [18]. Для підвищення маневреності, АНПА можуть бути оснащені додатковими азимутальними та бічними канальними гвинтами [11].

АНПА малого та середнього класу розробляються для завдань підводної інспекції та пошуку об'єктів на морському дні, виконують різноманітні завдання в сферах нафти та газу, оборони та безпеки, океанографії та моніторингу навколишнього середовища [8, 9, 13]. АНПА, що дозволяють отримати дані про морське дно або глибоководні конструкції, призначені для виконання місій на великих глибинах, від 300 до 6000 м, до них належать: Bedrock, Solus-LR AUV, Exail, X-300 Explorer, Remus 6000 [14, 15]. Для виконання таких завдань дані АНПА повинні мати високу енергоємність, наприклад AUV Theseus (International submarine engineering LTD) працював понад 60 годин під льодом на глибині 600 м. Remus 620 є АНПА з найбільшим радіусом дії у своєму класі. Завдяки терміну служби батареї до 110 годин і радіусу дії 275 морських миль, він забезпечує неперевершену багатоденну витривалість, радіус дії та непомітність [12].

Також, з метою підвищення енергоефективності та швидкості руху апарату виробники використовують

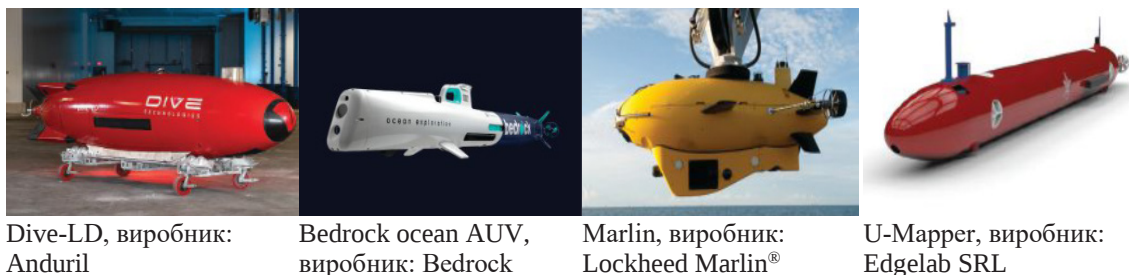
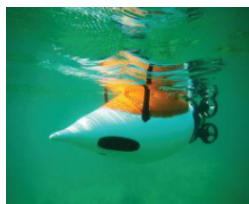


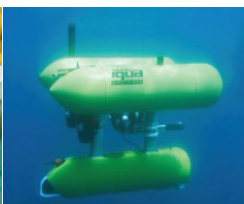
Рис. 1. АНПА малого та середнього класу різні за формою корпусу



Quadroin AUV,
виробник: Evologics



Imotus-1, виробник:
Cellula robotics LTD



Girona 500, виробник:
Iqua robotics



Sabertooth AUV/ROV,
виробник: Saab seaeye

Рис. 2. АНПА з реконфігурованою формою корпусу



Hydrus micro-AUV, виробник: Advanced
robotics



Jaiabot, виробник: Jaia robotics



Vertex AUV, виробник:
Hydromea



Fusion-hybrid, виробник:
Strategic robotic systems

Рис. 3. АНПА класів мікро та міні

специфічну форму корпусу (Evologics), для досягнення наднизьких коефіцієнтів лобового опору [14].

Реконфігурацію форми корпусу часто застосовують для розширення функціональної можливості АНПА. Підводний апарат Girona 500 складається з алюмінієвої рами, яка підтримує три торпедоподібні корпуси діаметром 0,3 м і довжиною 1,5 м, а також інші елементи, двигуни. Дана конструкція забезпечує хороші гідродинамічні характеристики та великий простір для розміщення обладнання, зберігаючи при цьому компактні розміри [19]. Деякі АНПА, які не потребують високої маневреності (в залежності від сфери застосування) оснащують чотирма гребними гвинтами – по одному на кожну вісь прив'язаної системи координат. До таких належать Imotus – апарат для проведення інспекцій у складних замкнутих просторах, Sabertooth – гібридний АУВ/РОВ для завдань з технічного обслуговування та ремонту, Aquanaut – робот, який може керувати проектами аквакультури, ремонтувати нафтопроводи та сканувати морське дно, рис. 2 [8, 20, 21].

Поширеним видом РКП є поєднання органів руху та керування – застосування двох або більше поворотних гвинтових колонок Sparus II AUV, Fusion-hybrid – багатоцільовий БПА з функціями АНПА, рис. 3 [19, 22].

Окремо можна виділити АНПА класу *мікро* і *міні* [10, 16]. Вони як правило є портативними і використовуються на менших глибинах, такі як Ecosub, Riptide, Hydrus, Hydromea Vertex, Yuso [17, 24, 25].

Апарати даного класу, як правило розробляють для виконання конкретної місії, наприклад, для внутрішнього огляду трубопроводів і тунелів (АНПА «Торпедо») [26–28]. Також, поширеним видом

застосування даних АНПА є поєднання їх у окремі групи, так званий рій, для виконання однієї місії, часто військової [11, 26, 29].

АНПА *великого* класу здебільшого використовують у складі флоту, щоб забезпечити постійну здатність підтримки зв'язку у морі між транспортними засобами та адаптивними місіями. Solus-XR – це наступне покоління надвеликого апарату без екіпажу (XLUUV) Cellula, який працює на паливних елементах і призначений для місій спостереження на великих відстанях із контролем від порту до порту. Даний АНПА призначений для перевезення оборонного або комерційного корисного вантажу у великих замінних модулях корисного навантаження [8, 10].

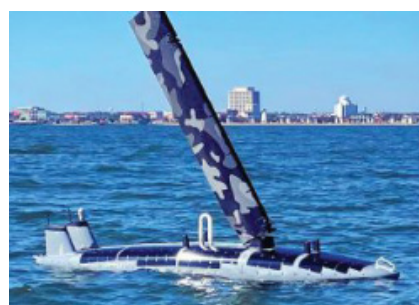


Рис. 4. AUV Triton, виробник: Ocean aero

На автономність АНПА, окрім енергоємності та витривалості, також впливає система навігації та зв'язку. Hydrus, див. рис. 3, здійснює революцію безпілотників під водою з найдосконалішими системами навігації та зв'язку з усіх підводних апаратів. Він містить інтегровані DVL, USBL, INS, акустичний і оптичний модеми. Це дозволяє виконувати високонадійні, повністю автономні підводні місії. Він

також забезпечує виявлення перешкод і уникнення зіткнень [23].

Triton – це єдиний у світі автономний апарат, рис. 4, що працює на вітру та сонці, який водночас плаває та занурюється під воду для збору даних і розвідки у важко доступних місцях на планеті. Розроблений за принципом інтелектуальної конструкції, із використанням передових матеріалів, Triton можна налаштувати для перевезення різноманітного корисного вантажу [29].

Набуває популярності використання АНПА у наукових дослідженнях. Такі апарати оснащують багатопараметричними датчиками які надають можливість вимірювати якість води, течії та батиметрію з безперервним інтервалом для місій (EcoMapper AUV) [30].

Даний аналіз свідчить про те, що на даний час найбільш поширеним типом рушійно-кермового пристрою підводних апаратів є гребний гвинт в насадці. Для розширення функціональних можливостей апарата та підвищення маневрових якостей використовують поворотну насадку, поворотну гвинтову колонку, а також, різні варіанти поєднання рушіїв. Даний аналіз також вказує на те, що для АНПА малого та середнього класів актуальною є одно(дво)гвинтова рушійна система, розташована співвісно вектору упору, який проходить через центр маси апарата. Також, досить поширеною є конструкція, що має по рушій (або декілька) у кожному напрямку руху апарата, однак, на практиці така конструкція частіше використовується для АНПА класів мікро та міні, або на АНПА спеціального призначення.

2. Математична модель просторового руху АНПА

Рух АНПА розглядається відповідно до законів механіки твердого тіла в тривимірному просторі з шістьма ступенями свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центра маси, інші три – обертання твердого тіла відносно центра маси. Кожній ступені свободи відповідає одна швидкісна координата, у якості якої виступає проекція вектору лінійної або кутової швидкості на відповідну вісь прийнятої координатної системи.

Миттєві значення швидкості руху твердого тіла підпорядковуються теоремам про зміну кількості руху й моменту кількості руху. Ці теореми виражаються у вигляді векторних рівнянь в нерухомій системі координат [31].

$$\frac{d\bar{K}}{dt} = \bar{R}; \quad \frac{d\bar{L}}{dt} = \bar{M},$$

де $\bar{K}$ – головний вектор кількості руху об'єкта; $\bar{L}$ – головний вектор моменту кількості руху відносно початку координатної системи; $\bar{R}$ – ізольований вектор зовнішніх сил; $\bar{M}$ – головний вектор моменту зовнішніх сил відносно початку координат.

Рівняння руху, як правило, записують в системі координат жорстко зв'язаній з корпусом АНПА.

Оскільки точка O – початок зв'язаної системи координат O_{xyz} – рухається з деякою лінійною швидкістю V , і сама координатна система повертається навколо з кутовою швидкістю Ω , тому у рівняннях про зміну кількості руху й моменту кількості руху, записаних у рухомій координатній системі, з'являються додаткові векторні добутки:

$$\frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{K} = \bar{R}; \quad \frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{L} \times \bar{V} = \bar{M}.$$

Проекції векторів кількості руху пов'язані з проекціями векторів лінійної і кутової швидкостей через матрицю інерції D .

$$\begin{bmatrix} K \\ L \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix}$$

Матриця інерції D представляє собою квадратну матрицю 6×6 із двох складових. Перша визначає власну інерцію твердого тіла, що рухається, і утворюється його масою і моментами інерції. Друга складова враховує кінетичну енергію часток середовища поблизу корпусу АНПА, які втягуються в процес руху.

Припустимо, що лінійна й кутова швидкості руху визначаються у зв'язаній координатній системі з початком у центрі маси, а корпус АНПА приймається подібним до еліпсоїда обертання, тоді матриця інерції стає діагональною. При діагональній матриці інерції справедливі наступні співвідношення:

$$\begin{cases} K_x = m_x V_x; K_y = m_y V_y; K_z = m_z V_z; \\ L_x = J_x \omega_x; L_y = J_y \omega_y; L_z = J_z \omega_z, \end{cases}$$

де, з урахуванням припущення про еліпсоїд обертання:

$$\begin{cases} m_x = (1 + k_{11})m; m_y = m_z = (1 + k_{22})m; \\ J_x = (1 + k_{44})J_{xx}; J_y = J_z = (1 + k_{55})J_{yy}. \end{cases}$$

де, $m = \rho v$ – маса, v – об'ємна водотоннажність АНПА, ρ – питома густина навколишнього середовища; k_{ii} – безрозмірні коефіцієнти; J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – головні моменти інерції відносно осей x, y, z .

Загальна форма рівнянь динаміки отримує вигляд:

$$\begin{cases} m_x \frac{dV_x}{dt} + m_z \omega_y V_z - m_y \omega_z V_y = R_x; \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x - m_z \omega_x V_z = R_y; \\ m_z \frac{dV_z}{dt} + m_y \omega_x V_y - m_x \omega_y V_x = R_z; \\ J_x \frac{d\omega_x}{dt} = M_x; \\ J_x \frac{d\omega_y}{dt} + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) + V_x V_z (m_x - m_z) = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \omega_y (J_y - J_x) + V_x V_y (m_y - m_x) = M_z. \end{cases}$$

При моделюванні руху АНПА всі зовнішні сили і моменти можна розділити на такі категорії:

- сили ваги й плавучості;
- гідродинамічні сили й моменти на корпусі, що виникають в результаті його взаємодії з потоком рідини;

– керуючі сили й моменти, що створюються засобами керування АНПА;

– сили й моменти, обумовлені хвиловими збуреннями, які з'являються в результаті впливу течії і морського хвилювання.

Як правило, АНПА будуються таким чином, щоб мати нульову плавучість, тому сили ваги компенсуються силою, що виштовхує, і з розгляду виключаються, вплив хвилювання моделюється у вигляді синусоїдальних сил відповідної амплітуди й частоти, що прикладаються до центру маси [31].

3. Визначення залежності гідродинамічних сил та моментів, що діють на елементи ізолюваного рушійно-кормового пристрою

Метою цієї роботи є визначення залежності гідродинамічних сил та моментів, що діють на елементи ізолюваного рушійно-кормового пристрою підводного апарату, від геометричних, кінематичних

та конструктивних характеристик при їх експлуатації. Розглянуто РКП що виготовляється фірмою Tecnapdyne [1] з наступними характеристиками.

Model 1060 в осьовому потоці при геометричних характеристиках насадки: коефіцієнт раствору – 1.29; внутрішній розрахунковий діаметр – 182.8 мм; відносне подовження – 0.5; тип профілю – модифікований профіль NASA і гребного гвинта: діаметр – 181.0 мм; дискове відношення – 0.7; тип профілю – NASA; відносний діаметр маточини – 0.2.

Засобами CFD-моделювання проведено дослідження РКП Tecnapdyne Model 1060 в осьовому потоці. З цією метою створено 3D модель РКП.

Сама модель гребного гвинта, насадки та приводу побудована в CAD Solid Works для певного набору функціональних параметрів, що визначають форму контуру та профільних перерізів лопатей.

Результати представлено на рис. 5–6.

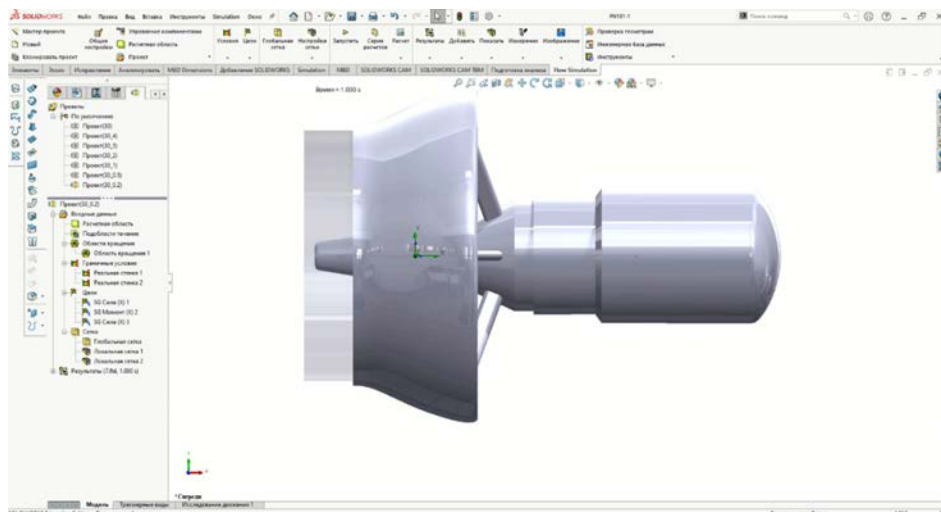


Рис. 5. Створення 3D моделі Tecnapdyne 1060

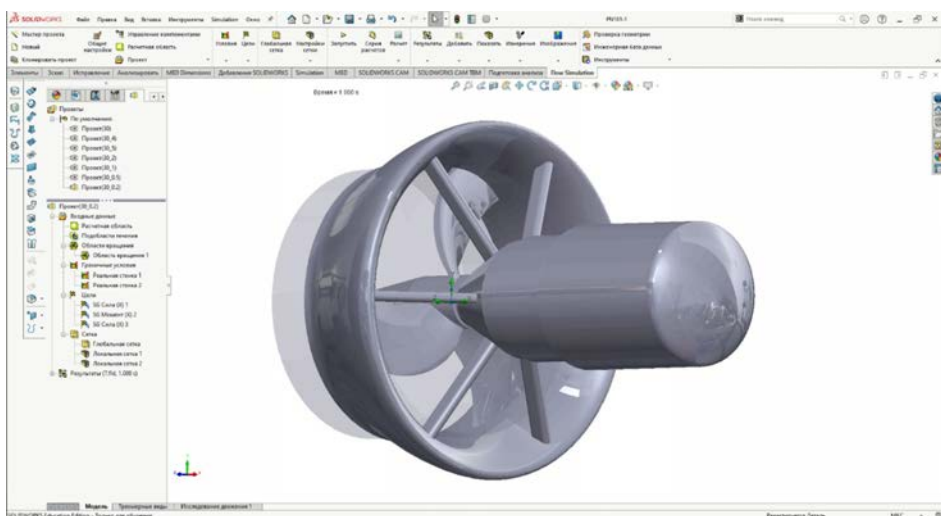


Рис. 6. 3D модель Tecnapdyne 1060

Напівпрозоре циліндричне тіло, зображене на цих рисунках – область обертання, необхідна для CFD моделювання тіл, що обертаються.

Результат моделювання CFD Tescnadyne 1060 в однорідному осьовому потоці представлено на рис. 7, у таблицях 1–2.

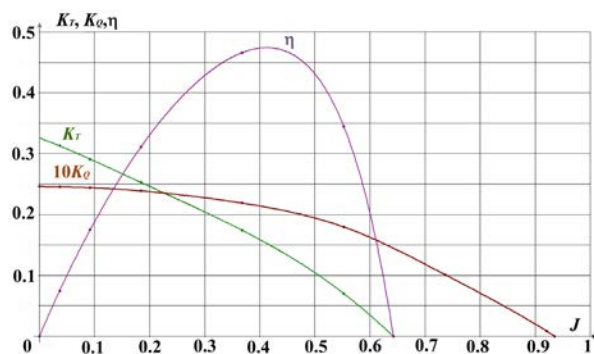


Рис. 7. Криві дії комплексу гвинт – насадка – привід Tescnadyne 1060 в осьовому потоці

Результати також представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків сил та моменту для Tescnadyne 1060

№	n , об/с	v , м/с	T , Н	Q , Нм	R , Н
1	30.0	0.2	179.26	-4.293	123.114
2	30.0	0.5	177.44	-4.270	103.360
3	30.0	1.0	171.91	-4.175	72.664
3	30.0	2.0	150.75	-3.827	17.252
5	30.0	3.0	109.86	-3.141	-41.854
6	30.0	4.0	26.70	-1.770	-112.091
7	30.0	5.0	-71.83	-0.149	-192.340

Позначено: упор гребного гвинта T , Н; момент, необхідний обертання гребного гвинта Q , Нм; осьова сила на приводі з насадкою R , Н.

Отримані залежності обраного рушійно-кормового пристрою застосовуємо в математичній моделі просторового руху АНПА.

Таблиця 2. Результати розрахунків для Tescnadyne 1060 у безрозмірному вигляді

№	$J = \frac{v}{nD}$	$K_r = \frac{T+R}{\rho n^2 D^4}$	$K_0 = \left \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \right $	$\eta_p = \frac{K_r J}{K_0 2\pi}$
1	0.0368	0.3130	0.02455	0.075
2	0.0921	0.2907	0.02442	0.175
3	0.1842	0.2532	0.02388	0.311
3	0.3683	0.1739	0.02189	0.466
5	0.5525	0.0704	0.01796	0.345
6	0.7366	-0.0884	0.01012	-
7	0.9208	-0.2735	0.00085	-

Основними складовими рушійно-кормового пристрою АНПА є електродвигун (ЕД), редуктор-валопровід (РВ) та гребний гвинт (ГГ), які

моделюються системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$L \frac{di}{dt} = K_u U - r_a i - \frac{c\Phi}{k_p} \omega_p;$$

$$J_{IT} \frac{d\omega_p}{dt} = M_{ED} - Q = \frac{c\Phi}{k_p} i - \frac{K_0 \rho D^5}{4\pi^2} \omega_p^2;$$

$$(m_{АНПА} + \lambda_p) \frac{dV_p}{dt} = T - F_p - F_{Dp} = \frac{K_r \rho D^4}{4\pi^2} \omega_p^2 - \frac{\rho C_p \Omega}{2} V_p^2 - F_{Dp},$$

де: L – індуктивність якоря ЕД, Гн;

i – миттєве значення електричного струму якоря ЕД, А;

K_u – коефіцієнт підсилення регулятора напруги ЕД;

U – керуючий сигнал регулятора напруги ЕД, В;

R – електричний опір якоря ЕД, Ом;

c, Φ – електромагнітні параметри ЕД, Вб;

k_p – коефіцієнт передачі редуктора;

ω_p – швидкість обертання ГГ, с⁻¹;

J_{IT} – сумарний момент інерції, приведений до ГГ, кг·м²;

$M_{ED} = c\Phi i / k_p$ – рушійний момент електродвигуна, кг·м²;

Q – гальмівний момент, що створюється гребним гвинтом, кг·м²;

$m_{АНПА}, \lambda$ – маса апарата та приєднана маса води, кг;

F_p – сила опору води руху АНПА, Н;

F_{Dp} – проекція сили зовнішнього збурення на вісь обертання ГГ, Н;

T – рушійна сила (упор) гребного гвинта, Н;

$K_0(J)$ – безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує момент гребного гвинта;

$K_r(J)$ – безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує упор гребного гвинта;

Ω – площа змоченої поверхні зовнішнього корпусу АНПА, м²;

J – відносний поступ ГГ;

D – діаметр ГГ, м;

ρ – густина води, кг·м⁻³;

V_p – проекція вектору швидкості переміщення РП відносно води на вісь прямого ходу ГГ, м/с.

Якщо записати описану вище систему рівнянь у вигляді рекурентної різницевої залежності, а гідродинамічні залежності РКП апроксимувати за допомогою кусково-лінійної інтерполяції, то отримаємо розрахункову модель, яка буде складовою частиною системи керування швидкістю руху АНПА [32].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Очевидно, що для підвищення точності керування просторовим рухом АНПА необхідно мати уточнені значення параметру керування (в даному випадку швидкості) за різних умов функціонування. Одним з важливих параметрів, що впливає на швидкість руху АНПА є упор гребного гвинта, як частина рушійно-кормового пристрою. Стабілізувати швидкість руху АНПА можливо шляхом урахування в системі керування уточненого значення упору РКП за різних умов функціонування. В роботі [33], представлено розробку САК швидкістю прямолінійного руху АНПА при роботі РКП у косому потоці води. В даній

САК відхилення упору РКП враховується у вигляді функціональної залежності упору РКП від швидкості та кута набігання потоку. В роботі [33] завдання стабілізації швидкості АНПА було вирішено для конкретних РКП, що розглядалися.

В роботі [34, 35] запропоновано методику отримання вибірки даних, що у векторному вигляді описує функціональну залежність упору гвинта від двох змінних, для подальшого застосування у САК. Наведено приклад успішного визначення уточнених параметрів РКП двох типів «гвинт в поворотній насадці» та «поворотна гвинтова колонка», від компанії Tecnadune, засобами CFD-моделювання з розробкою 3D моделей рушіїв.

В даній роботі пропонується зробити описану задачу більш універсальною, поєднавши математичне моделювання динаміки просторового руху АНПА та дослідження гідродинамічних параметрів, будь-якого необхідного (на прикладі Tecnadune Model 1060) РКП, засобами CFD-моделювання.

Реалізуючи в системі Simulink розрахункову модель просторового руху АНПА можна враховувати особливості динаміки корпусу апарату, поєднуючи їх із гідродинамічними характеристиками обраного типу РКП, що є сильним апаратом при розробці САК підвищеної точності.

За проведенням оглядом АНПА, що виробляються на даний час світовими виробниками, можна відзначити, що АНПА малого та середнього класів, з гребним гвинтом у якості РКП, займають значне місце серед автономних підводних апаратів. Також, необхідно відзначити, що в Україні на даний час при розробці АНПА використовують рушії від компанії Tecnadune.

ВИСНОВКИ

1. АНПА малого та середнього класу розробляються для завдань підводної інспекції та пошуку об'єктів на морському дні, виконують різноманітні завдання в сферах нафти і газу, оборони, безпеки, океанографії та моніторингу навколишнього середовища. АНПА середнього класу та більші можуть мати глибину занурення до 6000 м. Всі існуючі АНПА окрім розмірів можна класифікувати за наступними параметрами: автономність; енергоємність; витривалість; наявність та клас навігаційної системи.

2. Найбільш поширеним типом рушійно-кормового пристрою автономних ненаселених підводних апаратів є гребний гвинт в напрямній або поворотній насадці. Для АНПА малого та середнього класів актуальною є одно(дво)гвинтова рушійна система, розташована співвісно вектору упору, який проходить через центр маси апарата.

3. Математичне моделювання грає ключову роль в задачах синтезу САК АНПА, оскільки ряд методів синтезу ґрунтується на використанні моделей елементів об'єкта керування.

4. Засобами CFD-моделювання проведено дослідження РКП Tecnadune Model 1060 в осьовому потоці. В результаті отримано залежності: упору гребного гвинта T , Н; моменту, обертання гребного гвинта Q , Нм; осьової сили на приводі з насадкою R , Н, від частоти обертання гвинта n , об/с, що представлені в табличному вигляді. Побудовано криві дії комплексу гвинт – насадка – привід Tecnadune 1060 в осьовому потоці. Отримані залежності доповнюють математичну модель рушійно-кормового пристрою АНПА, яка є складовою частиною системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА.

REFERENCES

- [1] AUV Thrusters. Tecnadune. Retrieved from: <https://tecnadune.com/auv-thrusters>.
- [2] Gurylenko, S. O., Bouraou, N. I., & Surgok, V. O. (2023). Simulation and Analysis of the Complex Movement of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. *Electronic modeling*, 45(3), 81–91. [in Ukrainian].
- [3] Higuera, C., Sandoval, J., Coria, L. N., & Bugarin, E. (2022). An autonomous unmanned underwater control test vehicle: Platform description and experiments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(1), 395–405.
- [4] Chen, D., Neusypin, K. A., & Selezneva, M. S. (2020). Correction Algorithm for the Navigation System of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(8), 2365.
- [5] Elangovan, M. (2020). Hydrodynamic Energy Devices to Improve the Efficiency of Propulsion System in AUVs. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2(11), 18–22.
- [6] Ali, A., Alireza, P., & Saeed, N. (2022). Introduction on the modern air-independent hybrid propulsion systems for light Autonomous underwater vehicles (AUV). 1st International and 3rd National Conference on Marine Propulsion At: Automotive Engineering Research Center, University of Science and Technology, Iran. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/368919838>.
- [7] Anduril. Retrieved from: <https://www.anduril.com/>.
- [8] Imotus Family. Cellula Robotics. Retrieved from: <https://www.cellula.com/imotus-family>.
- [9] ORANGE SHARK Autonomy Underwater Vehicle (AUV). Retrieved from: <https://www.deepinfar.com/en-product-detail?productType=AUV>.
- [10] Amogh – Edgelab. Retrieved from: <http://www.edgelab.eu/our-products/auvs/u-deep>.
- [11] U_Tracker – Edgelab. Retrieved from: <http://www.edgelab.eu/our-products/auvs/u-tracker>.
- [12] EvoLogics and Hereon present the Quadroin AUV. EvoLogics GmbH. Retrieved from: <https://evologics.de/blog/news-2/post/evologics-and-hereon-present-the-quadroin-auv-69>.

- [13] A18D, AUV. Autonomous Underwater Vehicle. Exail. ECA Group. Retrieved from: <https://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle>.
- [14] REMUS 620. Retrieved from: <https://building-tech.org/>.
- [15] Explorer AUV. International Submarine Engineering. Retrieved from: <https://ise.bc.ca/product/explorer/>.
- [16] Autonomous Underwater Vehicle – AUV - HUGIN. Retrieved from: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-hugin/>.
- [17] EcoMapper AUV Autonomous Underwater Vehicle. ysi.com. Retrieved from: <https://www.ysi.com/ecomapper>.
- [18] Honcharenko, M. O. (2023). «Pidvodnyi dron» [Underwater drone]. Dyploinni proiekt na zdobuttia stupenia bakalavra za osvitho-profesiinoiu prohramoiu «Avtomatyzovani ta robotyzovani mekhanichni systemy» spetsialnosti 131 Prykladna mekhanika. [in Ukrainian].
- [19] Girona 500 AUV – IQUA Robotics. Retrieved from: <https://iquarobotics.com/girona-500-auv>.
- [20] Autonomous Underwater Vehicle. Aquanaut Subsea Robot. Nauticus Robotics. Retrieved from: <https://nauticusrobotics.com/aquanaut/>.
- [21] Sabertooth Single Hull. Saab Seaeye. Retrieved from: <https://www.saabseaeye.com/solutions/underwater-vehicles/sabertooth-single-hull>.
- [22] Fusion Modes. Retrieved from: <https://www.srsfusion.com/fusion-modes>.
- [23] HYDRUS MICRO-AUV. Advanced Navigation. Retrieved from: <https://www.advancednavigation.com/>.
- [24] Riptide unmanned undersea vehicles. BAE Systems. Retrieved from: <https://www.baesystems.com/en/product/riptide-family-of-autonomous-undersea-vehicles>.
- [25] VERTEX. Hydromea. Retrieved from: <https://www.hydromea.com/vertex-autonomous-underwater-swarm>.
- [26] Solutions – Jaia Robotics. Retrieved from: <https://www.jaia.tech/solutions/>.
- [27] SEAScout Unmanned Underwater Vehicle. Retrieved from: <https://www.qinetiq.com/en-us/what-we-do/services-and-products/seascout-unmanned-underwater-vehicle>.
- [28] Subsea Tech. Torpedo. Retrieved from: <https://www.subsea-tech.com/torpedo/>.
- [29] The TRITON. Ocean Aero. Retrieved from: <https://www.oceanaero.com/the-triton>.
- [30] Autonomous Underwater Resident Vehicle ARV-i Features. Boxfish Robotics. Retrieved from: <https://www.boxfishrobotics.com/products/arv-i/arv-i-features/>.
- [31] Blintsov, S. V. (2014). Teoretychni osnovy avtomatychnoho keruvannia avtonomnymi pidvodnymi aparatamy [Theoretical foundations of automatic control of autonomous underwater vehicles]. Natsionalnyi universytet imeni admiral Makarova. [in Ukrainian].
- [32] Blintsov, S. V., & Hrudinina, H. S. (2008). Zastosuvannia matematychnoi modeli rukhu pidvodnoho aparata dlia pobudovy optymalnoi za shvydkostiieiu systemy keruvannia z kompensatsiieiu zovnishnikh zburen [The application of a mathematical model of the movement of an underwater vehicle for the construction of a speed-optimized control system with compensation for external disturbances]. Zb. nauk. prats NUK. Mykolaiv: NUK, 3(420), 77–83. [in Ukrainian].
- [33] Blintsov, V. S., Burunina, Zh. Yu., Hrudinina, H. S. ta Nadtochyi, A. V. (2022). Udoskonalennia systemy avtomatychnoho keruvannia shvydkistiu rukhu avtonomnoho nenaselenoho pidvodnoho aparatu [Improvement of the system of automatic speed control of an autonomous underwater vehicle]. «Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky». – Kyiv: Vydavnychiy dim «Helvetyka», Tom 33 (72) № 4, S. 56–65. [in Ukrainian].
- [34] Blintsov, V. S., Hrudinina, H. S., Korol, Yu. M., ta Nadtochyi, A. V. (2021). Doslidzhennia roboty rushiino-rulovoho kompleksu pidvodnoho aparata v kosomu pototsi vody metodamy matematychnoho modeliuvannia [Study of the operation of the propulsion and steering complex of an underwater vehicle in an oblique flow of water by methods of mathematical modeling]. Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia, XI Vseukrainska naukovo-tekhnicna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu, NUK, 13–27. [in Ukrainian].
- [35] Hrudinina, H. S. (2023). Zastosuvannia matematychnoho modeliuvannia dlia utochnennia znachennia uporu rushiia v kosomu pototsi [The application of mathematical modeling to specify the value of the thrust of the thruster in an oblique flow]. Sudnobuduvannia ta morska infrastruktura. NUK, № 1(18)/2023, 60–72. [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] AUV Thrusters. *Tecnadyne*. URL: <https://tecnadyne.com/auv-thrusters>
- [2] Gurynenko, S. O., Bouraou, N. I., & Surgok, V. O. (2023). Simulation and Analysis of the Complex Movement of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. *Electronic modeling*, 45(3), 81–91.
- [3] Higuera, C., Sandoval, J., Coria, L. N., & Bugarin, E. (2022). An autonomous unmanned underwater control test vehicle: Platform description and experiments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(1), 395–405. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-1238-0>.
- [4] Chen, D., Neusypin, K. A., & Selezneva, M. S. (2020). Correction Algorithm for the Navigation System of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(8), 23–65. <https://doi.org/10.3390/s20082365>.
- [5] Elangovan, M. (2020). Hydrodynamic Energy Devices to Improve the Efficiency of Propulsion System in AUVs. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2(11), 18–22. <https://doi.org/10.47392/irjash.2020.21>.

- [6] Ali, A., Alireza, P., & Saeed, N. (2022). *Introduction on the modern air-independent hybrid propulsion systems for light Autonomous underwater vehicles (AUV)*. 1st International and 3rd National Conference on Marine Propulsion At: Automotive Engineering Research Center, University of Science and Technology, Iran. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368919838>.
- [7] Anduril. URL: <https://www.anduril.com/>.
- [8] Imotus Family. Cellula Robotics. URL: <https://www.cellula.com/imotus-family>.
- [9] ORANGE SHARK Autonomy Underwater Vehicle (AUV). URL: <https://www.deepinfar.com/en-product-detail?productType=AUV>
- [10] Amogh – Edgelab. URL: <http://www.edgelab.eu/our-products/auvs/u-deep>.
- [11] U_Tracker – Edgelab. URL: <http://www.edgelab.eu/our-products/auvs/u-tracker>.
- [12] EvoLogics and Hereon present the Quadroin AUV. EvoLogics GmbH. URL: <https://evologics.de/blog/news-2/post/evologics-and-hereon-present-the-quadroin-auv-69>.
- [13] A18D. AUV. Autonomous Underwater Vehicle. Exail. ECA Group. URL: <https://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle>.
- [14] REMUS 620. URL: <https://building-tech.org/>.
- [15] Explorer AUV. International Submarine Engineering. URL: <https://ise.bc.ca/product/explorer/>.
- [16] Autonomous Underwater Vehicle – AUV - HUGIN. URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-hugin/>.
- [17] EcoMapper AUV Autonomous Underwater Vehicle. ysi.com. URL: <https://www.ysi.com/ecomapper>.
- [18] Гончаренко, М. О. (2023). «Підводний дрон». Дипломний проєкт на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані механічні системи» спеціальності 131 Прикладна механіка.
- [19] Girona 500 AUV – IQUA Robotics. URL: <https://iquarobotics.com/girona-500-auv>
- [20] Autonomous Underwater Vehicle. Aquanaut Subsea Robot. Nauticus Robotics. URL: <https://nauticusrobotics.com/aquanaut/>.
- [21] Sabertooth Single Hull. Saab Seaeye. URL: <https://www.saabseaeye.com/solutions/underwater-vehicles/sabertooth-single-hull>.
- [22] Fusion Modes. URL: <https://www.srsfusion.com/fusion-modes>.
- [23] HYDRUS MICRO-AUV. Advanced Navigation. URL: <https://www.advancednavigation.com/>.
- [24] Riptide unmanned undersea vehicles. BAE Systems. URL: <https://www.baesystems.com/en/product/riptide-family-of-autonomous-undersea-vehicles>.
- [25] VERTEX. Hydromea. URL: <https://www.hydromea.com/vertex-autonomous-underwater-swarm>.
- [26] Solutions – Jaia Robotics. URL: <https://www.jaia.tech/solutions/>.
- [27] SEAScout Unmanned Underwater Vehicle. URL: <https://www.qinetiq.com/en-us/what-we-do/services-and-products/seascout-unmanned-underwater-vehicle>.
- [28] Subsea Tech. Torpedo. URL: <https://www.subsea-tech.com/torpedo/>.
- [29] The TRITON. Ocean Aero. URL: <https://www.oceanaero.com/the-triton>.
- [30] Autonomous Underwater Resident Vehicle ARV-i Features. Boxfish Robotics. URL: <https://www.boxfishrobotics.com/products/arv-i/arv-i-features/>.
- [31] Блінцов, С. В. (2014). *Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами*. Національний університет імені адмірала Макарова.
- [32] Блінцов, С. В., & Грудініна, Г. С. (2008). Застосування математичної моделі руху підводного апарата для побудови оптимальної за швидкістю системи керування з компенсацією зовнішніх збурень. *Зб. наук. праць НУК. Миколаїв: НУК*, 3(420), 77–83.
- [33] Блінцов, В. С., Буруніна, Ж. Ю., Грудініна, Г. С. та Надточий, А. В. (2022). Удосконалення системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарату. «Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Київ: Видавничий дім «Гельветика», 33 (72), 56–65. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/10>.
- [34] Блінцов, В. С., Грудініна, Г. С., Король, Ю. М., та Надточий, А. В. (2021). *Дослідження роботи рушійно-рульового комплексу підводного апарата в косому потоці води методами математичного моделювання*. Підводна техніка і технологія, XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю, НУК, 13–27.
- [35] Грудініна, Г.С. (2023). Застосування математичного моделювання для уточнення значення упору рушія в косому потоці. *Суднобудування та морська інфраструктура*. НУК, 1(18)/2023, 60–72.

© Грудініна Г. С.

Дата надходження статті до редакції: 01.04.2024

Дата затвердження статті до друку: 15.04.2024