DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.2\(480\).11](https://doi.org/10.15589/znp2020.2(480).11)
УДК 629.58:681.5

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HEADING REGULATOR OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE WITH A RADIO BEACON

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА КУРСУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕННОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ З РАДІОБУЄМ

Andriy S. Sirivchuk
sirivchuka@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2927-2600

А. С. Сірівчук
ст. викладач

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

Abstract. Underwater lighting is an important part of business. Most of the water areas of Ukraine are in shallow water. An effective means of lighting the underwater situation in shallow water areas is the use of autonomous unmanned underwater vehicles with a beacon.

When using this type of underwater vehicle, it becomes necessary to automate routine tasks, which will greatly facilitate the work of the operator and increase overall efficiency.

One of the important tasks of automating the movement of an autonomous unmanned underwater vehicle with a beacon is an automatic course stabilization system. Using mathematical modeling, it is impossible to ensure the full reliability of the experiment, therefore, after the synthesis of the controller on a mathematical model, it becomes necessary to confirm the result using a full-scale experiment.

The aim of the work is to confirm the operability of the synthesized course controller, which is included in the motion control system of an autonomous unmanned underwater vehicle with a beacon, using a full-scale experiment.

Since it is not possible to conduct a full-scale experiment using an unmanned underwater vehicle with a radio beacon, it was decided to conduct it using a tethered underwater vehicle with a similar structure of a propulsion system. The use of a tethered underwater vehicle is justified by the presence of all external disturbances, as for an autonomous unmanned underwater vehicle with a beacon.

To increase the reliability of the current course, three sensors are used: a gyroscope, accelerometer and magnetometer. Using the Majwik filter partially compensates for the shortcomings of each type of sensor.

After a full-scale experiment, the transition process time is 5 s, and the oscillations of the stabilization point do not exceed 1°, which is due to the accuracy of the sensors.

A full-scale experiment confirms the efficiency of the controller, and the transition process is small in comparison with mathematical modeling.

Key words: full-scale experiment; fuzzy logic; heading control.

Анотація. Висвітлення підводної обстановки є важливою частиною морегосподарської діяльності. Велика частина водних акваторій України припадає на мілководдя. Ефективним засобом висвітлення підводної обстановки на мілководних акваторіях є використання автономних ненаселених підводних апаратів з радіобуєм.

Під час використання даного типу підводного апарата виникає необхідність автоматизації рутинних задач, що значно полегшить роботу оператора та збільшить ефективність роботи в цілому.

Однією з важливих задач автоматизації руху автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм є автоматична система стабілізації курсу. За допомогою математичного моделювання неможливо забезпечити повну достовірність експерименту, тому після синтезу регулятора на математичній моделі виникає необхідність підтвердження результату за допомогою натурного експерименту.

Метою роботи є підтвердження працездатності синтезованого регулятора курсу, що входить до системи керування рухом автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, за допомогою натурного експерименту.

Оскільки немає можливості провести натурний експеримент за допомогою ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, то було прийнято рішення провести його за допомогою прив'язного підводного апарата з аналогічною структурою рушійно-кормового комплексу. Використання прив'язного підводного апарата виправдовується наявністю всіх тих зовнішніх збурень, що й для автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм.

Для підвищення достовірності поточного курсу використовується три датчики: гіроскоп, акселерометр та магнітометр. За допомогою фільтру Маджвіка часткового компенсуються недоліки кожного типу датчиків.

Після проведення натурного експерименту час перехідного процесу становить 5с, а коливання точки стабілізації не перевищують 1° , що зумовлено точністю датчиків.

Проведений натурний експеримент підтверджує працездатність роботи регулятора, а перехідний процес має меншу різницю, ніж під час математичного моделювання.

Ключові слова: натурний експеримент; нечітка логіка; стабілізатор курсу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Україна як морська держава володіє внутрішніми та зовнішніми територіальними водами, які мають вихід в Азово-Чорноморський басейн. Дані акваторії активно використовуються в різних сферах людської діяльності, до якої належать: видобування промисловість, морський транспорт та військова діяльність [1; 2].

Використання територіальних вод вимагає постійного висвітлення підводної обстановки на великих акваторіях, і в першу чергу акваторіях, які активно використовуються: порти, якірні стоянки, рекомендовані транспортні шляхи, морські трубопроводи та військово-морські бази [3].

Зазвичай світова практика свідчить, що найбільш ефективними засобами висвітлення підводної обстановки є підводні апарати, оскільки вони мають ряд переваг, таких як: довгий час роботи, використання за несприятливих погодних умов та забрудненнях акваторії, швидкість підготовки до роботи і безпека для людського життя.

Для висвітлення підводної обстановки на мілководних акваторіях пропонується використання автономних ненаселених підводних апаратів із радіобуєм (АНПА РБ), оскільки даний тип підводних апаратів має великий радіус дії (декілька кілометрів при прямій видимості) та можливість передачі інформації

в режимі реального часу [4]. Склад АНПА РБ показано на рис. 1.

Автоматизації роботи АНПА РБ значно полегшує процес висвітлення підводної обстановки, оскільки рутинна робота оператора передається на контроль системі автоматичного керування.

Синтез системи автоматичного керування рухом АНПА РБ є складною задачею, оскільки необхідно проводити низку експериментів для визначення основних законів керування та перевірки їх ефективності. Для цього синтез системи автоматичного керування рухом АНПА РБ проводиться за допомогою математичного моделювання [5], а підтвердження для результатів роботи проводиться натурний експеримент.

Важливою складовою частиною системи автоматичного керування рухом АНПА РБ є регулятор курсу апарата, якісна робота якого забезпечує точність виконання ним підводної місії. Досвід колективу науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова у створенні систем автоматичного керування засобами підводної робототехніки свідчить, що одним із ефективних шляхів створення регуляторів їх просторового руху є нечіткі регулятори [6]. Тому актуальною є прикладна наукова задача синтезу та перевірки ефективності роботи регулятора курсу АНПА РБ як нового виду підводної робототехніки.

Рис. 1. Структура АНПА РБ

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Однією з важливих задач, що ставляться перед системою автоматичного керування, є саме стабілізація курсу. Регулятори стабілізації курсу входять до складу низки систем автоматичного керування: стабілізації підводного апарата на заданій відстані від об'єкта [7; 8], траєкторного руху [9], системи підтримання дистанції [10] тощо.

Система автоматичного керування, що описана в [7], базується на використанні ПД регуляторів, використання класичних ПД регуляторів є недостатньо ефективним, оскільки рух підводного апарата має низку нелінійностей, таких як опір корпусу судна, упор гребного гвинта тощо. Сигнал керування від кожного регулятора займає невід'ємну частину від його максимального значення.

Для регулювання курсу також використовують двухконтурний ПД регулятор [11]. Даний регулятор надійно працює в заданих інтервалах роботи за допомогою набору ПД регуляторів.

У [12] представлено нейронно-нечіткий регулятор курсу, що налаштовується за допомогою нейронної мережі. Представлений регулятор має середню похибку, яка складає 1.08 градуса. Підвищення точності регулятора можливе за рахунок збільшення кількості вибірок регулятора.

Реалізація нечіткого регулятора курсу в [13] показує переваги використання нечіткої логіки перед класичними ПД регуляторами. Розроблений регулятор використовується для автономного підводного апарата в умовах невизначеності.

У роботі [14] показано, що застосування нейронно-нечіткого підходу в якості закону керування в регуляторах курсу судна дає досить високі результати. Однак регулятори мають складну структуру, а якість їхньої роботи сильно залежить від точності математичних моделей, що використовуються під час їх навчання.

Методика, що представлена в [15], вирішує задачу стабілізації параметрів підводного апарата методом мінімізації локальних функціоналів. Дана методика забезпечує високу динамічну стійкість, але має великий час перехідного процесу.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Моделювання роботи АНПА РБ не дає можливості повністю забезпечити гідродинамічну подібність моделі та реального апарата [16; 17], що зумовлено допусками в математичній моделі руху, а також додатковими зовнішніми збуреннями в підводному середовищі. Тому для остаточної перевірки результатів розрахунків і модельних експериментів необхідно проводити натурні випробування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є проведення натурального експерименту для дослідження ефективності роботи регу-

лятору курсу в складі системи автоматичного руху АНПА РБ.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості *об'єкта дослідження* обрано автономний підводний апарат із радіобуєм, який призначений для моніторингу підводної обстановки на мілководних акваторіях.

Предмет дослідження – регулятор курсу, що входить до складу системи керування рухом АНПА РБ [5].

Дослідження виконувались шляхом організації та проведення натурального експерименту за спеціально розробленою програмою і методикою та в умовах, близьких до умов експлуатації АНПА РБ. Система керування підводним апаратом побудована за допомогою програмного забезпечення *Matlab Simulink*. Вибір даного програмного продукту зумовлюється простотою виведення та обробки матеріалів дослідження.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Постановка натурних експериментів і обробка їхніх результатів дуже часто бувають складними в реалізації, тому розробляються методики і обладнання, які дають змогу проводити дослідження в умовах, близьких до натурних.

Натурний експеримент проводився згідно з розробленою «Програмою і методиками морського натурального експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм», яка була розроблена в науково-дослідному інституті підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (УКФА.361192.008 ПМ).

Як макет АНПА РБ було використано прив'язну підводну систему проекту «Гідрограф» (рис. 2). Даний підводний апарат має структуру русійно-кормового комплексу (РКК), що забезпечує можливість імітувати АНПА РБ, який описаний в [5], а наявність кабельтросу імітує зовнішні збурення від кабель-буксиру РБ.

Рис. 2. Зовнішній вигляд підводного апарата проекту «Гідрограф»

Рис. 3. Структура системи дослідження ефективності регулятора курсу

Підводний апарат проекту «Гідрограф» має такі основні технічні характеристики:

- максимальна робоча глибина – 250 м;
- габаритні розміри – 1220х600х540 мм;
- маршова швидкість – 2 вузла;
- максимальна довжина кабель-тросу до 400 м;
- вага апарата 97 кг;
- електроживлення – 220В, 50 Гц, 2 кВт;
- кількість членів екіпажу – 2 чол.

Однією з особливостей натурного експерименту є те, що самі сенсори мають обмежену точність вимірювання, а також можуть вносити свої похибки в систему керування.

Так, під час визначення курсу за допомогою магнітометру та акселерометру виникає велика похибка при наближенні підводного апарата до металевих конструкцій.

Під час використання гіроскопа як датчика курсу виникає технічна проблема: у стані спокою він має невелике зміщення на своїх осях, що призводить до поступового зміщення показників.

Для компенсації вказаних недоліків використовується фільтр Маджвіка [18]. В якості інструменту використовуються кватерніони [19], які дозволяють використовувати дані акселерометра і магнітометра для аналітичних обчислень і оптимізації методом градієнтного спуску в отриманні похибки напрямки гіроскопа у вигляді похідного кватерніона.

Для дослідження якості регулятора курсу (рис. 3) в якості зворотного зв'язку використовуються показники трьох датчиків: акселерометра $S_{\hat{a}t}$, магнітометра $S_{\hat{m}t}$ та гіроскопа $S_{\hat{o}t}$. В якості блоку датчиків виступає MPU9250. Даний модуль включає в себе трьохосовий акселерометр, трьохосовий магнітометр та трьохосовий гіроскоп, що виконані на одній мікросхемі [19]. Такий підхід виключає можливість не співвісної установки на підводному апараті.

Для маршового руху використовується незмінний сигнал керування, що забезпечує однонаправлений упор маршових рухів p_{vm} , а сингал, різниці упорів маршових рухів p_{ϕ} задається регулятором курсу.

Дані сигнали передаються у відносних одиницях. У натурному експерименті сигнал p_{vm} становив 0,75.

Регулятор потужності реалізує наступне рівняння:

$$\bar{U}_{PKK} = U_{max} \begin{cases} [p_{vm} - p_{\phi} & p_{vm} + p_{\phi} & p_{vm}] & \text{при } |p_{vm}| + |p_{\phi}| \leq 1 \\ \left[\frac{p_{vm}}{|p_{vm}|} (1 - |p_{\phi}|) - p_{\phi} & \frac{p_{vm}}{|p_{vm}|} (1 - |p_{\phi}|) + p_{\phi} & p_{vm} \right] & \text{при } |p_{vm}| + |p_{\phi}| > 1 \end{cases},$$

де U_{max} – максимальне значення сигналу керування.

Для стабілізації курсу використовується нечіткий ПД регулятор (рис. 4), на виході якого формується сигнал керування в відносних одиницях [5].

Рис. 4. Терми нечіткого регулятора курсу: а) похибка ε_{ϕ} ; б) диференціал похибки $d\varepsilon_{\phi}$; в) вихідний сигнал p_{ϕ}

----- — задане значення; ———— — діюче значення

Рис. 5. Перехідний процес стабілізації курсу: а) моделювання; б) натурний експеримент

База правил регулятора курсу представлена в вигляді табл. 1.

Таблиця 1. База правил нечіткого РК

$d\epsilon_\varphi$ \ ϵ_φ	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	PS	P	NB
N	PB	PS	P	Z	NB
Z	PB	P	Z	N	NB
P	PB	Z	N	NS	NB
PB	PB	N	NS	NB	NB

Для перевірки якості роботи регулятора курсу знімаємо перехідний процес стабілізації курсу (рис. 5).

Показники якості регулятора представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Показники якості роботи регулятора

№	Показник	Натурний експеримент	Моделювання
1.	Початкове відхилення, град	20	20
2.	Час перехідного процесу, с	5	2,75
3.	Статична похибка, град	відсутня	відсутня
4.	Перерегулювання, град	3,5	1,2
5.	Амплітуда коливань, град	1	відсутня

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У ході натурного експерименту було доведено працездатність регулятора курсу. Показники якості

та форма перехідного процесу несуттєво відрізняються від тих, що були отримані під час математичного моделювання системи.

ВИСНОВКИ

На основі розробленої «Програми і методики морського натурного експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм» було проведено експериментальне дослідження ефективності функціонування регулятора курсу діючого макету АНПА РБ. Точність вимірювання курсу було забезпечено використанням блоку датчиків MPU9250, дані якого корегуються фільтром Маджвіка.

За допомогою натурного експерименту було доведено працездатність роботи регулятора курсу в складі системи автоматичного керування рухом діючого макету АНПА РБ, при незмінному сигналі керування для маршового руху, що підтверджує правильність проведеного математичного моделювання. Коливання при встановленому режимі зумовлені інструментальною похибкою.

Подальші дослідження плануються в напрямку створення дослідного зразка АНПА РБ та проведення морських натурних експериментів із перевірки ефективності функціонування системи автоматичного керування його стабілізованим та маневровим рухом.

REFERENCES

- [1] Vnutrishni vodni shliakhy Yevropeiskoho Soiuzu. Informatsiina dovidka, pidhotovlena Yevropeiskym informatsiinoslidsnytskym tsentrom na zapyt narodnoho deputata Ukrainy [Inland waterways of the European Union. Information inquiry prepared by the European Information and Research Center at the request of the People's Deputy of Ukraine]. URL: <http://radaprogram.org/sites/default/files/infocenter/publications/9.pdf> [in Ukraine].
- [2] Ofitsiyniy sait Derzhavnoho pidpriemstva «Ukrvodshliakh» [Official site of the State Enterprise «Ukrvodshliakh»]. URL: <http://ukrvodshliakh.org.ua/> [in Ukraine].
- [3] Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). Improvement of technical supply of projects of robotized monitoring of underwater conditions in shallow water areas. EUREKA : Physics and Engineering, 3, 41–49.

- [4] Blintsov, V. S. & Sirivchuk, A. S. (2017) Suchasni zadachi avtomatyzatsii keruvannia avtonomnym nenaselenym pidvodnym aparatom z radiobuieim [Modern tasks of automation control for the autonomous unmanned underwater Vehicle With a radio beacon]. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 470/3, 56–62. [in Ukraine].
- [5] Sirivchuk, A. S. (2019) Rozrobka systemy avtomatichnoho keruvannia rukhom pidvodnoho aparata poshukovoho typu [Development of a system of automatic control of motion of underwater vehicles searching type]. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 2, 22–28. [in Ukraine].
- [6] Blintsov, V. & Aloba, L. (2019) Control Automation of Maritime Unmanned Complex With a Group of Autonomous Underwater Vehicles control, Eureka: Physics and Engineering. Issue 2. P. 30–42. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00854.
- [7] Kuhn Vinicius N., Drews-Jr Paulo, Sebastião C P Gomes & Silvia da Costa Botelho (2014) Automatic Control of a ROV for Inspection of Underwater Structures Using a Low Cost Sensing *Journal Of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. doi: 10.1007/s40430-014-0153-z.
- [8] Blintsov, V. S. & Nadtochii, V. A. (2012) Suchasni zadachi avtomatyzatsii keruvannia samokhidnymi pryv'язnymi pidvodnymi systemamy z nachipnym obladnanniam [Modern automation of management tasks propelled tethered underwater systems with attached implements]. Zbirnyk naukovykh prats NUK. 2. 79–83. [in Ukraine].
- [9] JiaWang Chen, Huangchao Zhu, Lei Zhang & Yuxia Sun (2018) Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization. *Ocean Engineering*. 156. 217–223.
- [10] Burunina Zhanna Yu. et al. (2018) Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 10/2. 116–139.
- [11] Gayvoronskiy, Sergey A., Khozhaev, Ivan V. & Ezangina Tatiana A. (2017) Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*, 5, 378–384.
- [12] Shigapov, R.D. (2012) Obuchenie neyro-nechetkoy sistemyi upravleniya harakteristikam zadannoy sistemyi upravleniya dvizheniem neobitaemogo podvodnogo aparata [Training a neuro-fuzzy control system for the characteristics of a given motion control system for an unmanned underwater vehicle]. *Avtomatizatsiya protses sov upravleniya*, 28/2, 44–48. [in Russian]
- [13] Zaopeng Dong, Lei Wan, Tao Liu & Jiayuan Zhuang (2015) Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference, *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*, 1402–1407.
- [14] Podporin, S. A. (2011) Neyronnyiy upravlyayushchiy kontroller v zadache avtomaticheskogo upravleniya sudnom na menyayushchimsya kurse [A neural control controller in the task of automatically controlling a ship in a changing course], *Sudovojdenie: Sb. nauchn. trudov ONMA*, 19, 156–165.
- [15] Blintsov, O., Korytskyi, V. and V. Sokolov (2019) Synthesis of precise automatic control system of a second order object in uncertainty conditions. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6, 1218–1228.
- [16] Zhi Quan Leong (2014) Effects of Hydrodynamic Interaction on an AUV Operating Close to a Moving Submarine, *University of Tasmania*, 227.
- [17] Brooks Louis-Kiguchi Reed (2015) Controller Design for Underwater Vehicle Systems with Communication Constraints. *Massachusetts Institute of Technology*, 301.
- [18] Sebastian, O.H. (2010) Madgwick An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf.
- [19] MPU-9250 Product Specification, URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.
- [20] Vladimir Trifonov (2007) Natural Geometry of Nonzero Quaternions, *International Journal of Theoretical Physics*, Springer Netherlands, 46/2, 251–257.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Внутрішні водні шляхи Європейського Союзу. Інформаційна довідка, підготовлена Європейським інформаційно-дослідницьким центром на запит народного депутата України. URL: <http://radaprogram.org/sites/default/files/infocenter/publications/9.pdf>.
- [2] Офіційний сайт Державного підприємства «Укрводшлях». URL: <http://ukrvodshliah.org.ua/>.
- [3] Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). Improvement of technical supply of projects of robotized monitoring of underwater conditions in shallow water areas. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49.
- [4] Блінцов, В. С. & Сіривчук, А. С. (2017) Сучасні задачі автоматизації керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм. *Збірник наукових праць НУК*, 470/3, 56–62.
- [5] Сіривчук, А. С. (2019) Розробка системи автоматичного керування рухом підводного апарата пошукового типу. *Збірник наукових праць НУК*, 2, 22–28.
- [6] Blintsov, V. & Aloba, L. (2019) Control Automation of Maritime Unmanned Complex With a Group of Autonomous Underwater Vehicles control, *Eureka: Physics and Engineering*. Issue 2. Pages 30–42. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00854.
- [7] Kuhn Vinicius N., Drews-Jr Paulo, Sebastião C P Gomes & Silvia da Costa Botelho (2014) Automatic Control of a ROV for Inspection of Underwater Structures Using a Low Cost Sensing *Journal Of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. doi: 10.1007/s40430-014-0153-z.
- [8] Блінцов В.С. & Надточій В.А. (2012) Сучасні задачі автоматизації керування самохідними прив'язними підводними системами з начіпним обладнанням. *Збірник наукових праць НУК*. 2. 79–83

- [9] JiaWang Chen, Huangchao Zhu, Lei Zhang & Yuxia Sun (2018) Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization. *Ocean Engineering*. 156. 217–223.
- [10] Burunina Zhanna Yu. et al. (2018) Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 10/2. 116–139.
- [11] Gayvoronskiy, Sergey A., Khozhaev, Ivan V. & Ezangina Tatiana A. (2017) Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*. 5. 378–384.
- [12] Шигапов Р.Д. (2012) Обучение нейро-нечеткой системы управления характеристикам заданной системы управления движением необитаемого подводного аппарата. *Автоматизация процес сов управления*, 28/2 , 44–48.
- [13] Zaopeng Dong, Lei Wan, Tao Liu & Jiayuan Zhuang (2015) Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference, *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*, 1402–1407.
- [14] Подпорин С.А. (2011) Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе, Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, 19, 156–165.
- [15] Blintsov, O., Korytskyi, V. and V. Sokolov (2019) Synthesis of precise automatic control system of a second order object in uncertainty conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6, 1218–1228.
- [16] Zhi Quan Leong (2014) Effects of Hydrodynamic Interaction on an AUV Operating Close to a Moving Submarine, University of Tasmania, 227.
- [17] Brooks Louis-Kiguchi Reed (2015) Controller Design for Underwater Vehicle Systems with Communication Constraints. Massachusetts Institute of Technology, 301.
- [18] Sebastian, O.H. (2010) Madgwick An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf
- [19] Vladimir Trifonov (2007) Natural Geometry of Nonzero Quaternions, *International Journal of Theoretical Physics*, Springer Netherlands, 46/2, 251–257.
- [20] MPU-9250 Product Specification, URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.

© А. С. Сірівчук

Дата надходження статті до редакції: 12.06.2020

Дата затвердження статті до друку: 10.07.2020