DOI [https://doi.org/10.15589/znп2019.2\(476\).4](https://doi.org/10.15589/znп2019.2(476).4)
УДК 629.58:681.5

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF MOTION OF UNDERWATER VEHICLES SEARCHING TYPE

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНОГО АПАРАТА ПОШУКОВОГО ТИПУ

Andrii 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, м. Миколаїв

Abstract. Remote-controlled underwater vehicles are an effective tool for monitoring the underwater situation. In shallow waters, it is advisable to use autonomous underwater vehicles with a beacon. The composition of the propulsion and steering complex of such devices should have an optimal number of engines and provide high maneuverability. Therefore, the structure of the propulsion and steering complex was chosen, which is composed of two mid-flight and one vertical engine.

The aim of the work is the development of an automatic motion control system for an autonomous underwater vehicle with a beacon, the propulsion-steering complex of which includes one vertical and two mid-flight propulsion, based on fuzzy logic. The research is carried out by the method of mathematical modeling in the environment of MatLab-Simulink.

A feature of the developed system is the dynamic distribution of power between the tasks of turning and stabilizing the cruising speed. This is ensured by the power distribution unit, the task of which is to establish a control signal to the right and left main engine separately. If the total control signal for the cruising speed and course change exceeds the maximum, then the signal processing priority is given to the control of the course, and the remainder is given to the cruising speed. For the automatic motion control system, heading and forward speed controllers based on fuzzy logic have also been developed.

For translational speed, a PI controller is used, which provides stabilization of vertical and cruising speed. The output of the vertical speed controller is the power factor of the vertical propulsion device, and the output of the sustainer controller is the power factor of the general operation of the marching engines.

To stabilize the course, a fuzzy PD controller is used, the output of which is the coefficient of the power difference between the mid-flight engines.

The novelty of the developed control system is due to the dynamic distribution of the control signal for the marching propulsors between its marching and turning movement.

This motion control system is intended as a component of the lower level of the three-level hierarchical control system of search-type underwater vehicles. And it is used for stabilization tasks on the course or at a point.

Key words: fuzzy logic; heading controller; translational speed controller.

Анотація. Телекеровані підводні апарати є ефективним засобом для моніторингу підводної обстановки. На мілководних акваторіях доцільне використання автономних підводних апаратів із радіобуєм. Склад рушійно-кермового комплексу таких апаратів повинен мати оптимальну кількість двигунів і забезпечувати високу маневреність. Тому було обрано структуру рушійно-кермового комплексу, що складається із двох маршових та одного вертикального двигуна.

Метою роботи є розробка системи автоматичного керування рухом для автономного підводного апарата з радіобуєм, до складу рушійно-кермового комплексу якого входить один вертикальний і два маршові рушії, на основі нечіткої логіки. Дослідження проводиться методом математичного моделювання в середовищі MatLabSimulink. Особливістю розробленої системи є динамічне розподілення потужності між задачами повороту та стабілізації маршової швидкості. Це забезпечується блоком розподілення потужності, задачею якого є встановлення сигналу керування на правий і лівий маршовий двигун окремо. Якщо сумарний сигнал керування для маршової швидкості та зміни курсу перевищує максимальний, то пріоритет відпрацювання сигналу віддається регулюванню курсу, а залишок – маршовій швидкості.

Для системи автоматичного керування рухом також було розроблено регулятори курсу та поступальної швидкості на основі нечіткої логіки.

Для поступальної швидкості використовуються ПІ регулятор, який забезпечує стабілізацію вертикальної та маршової швидкості. Виходом регулятора вертикальної швидкості є коефіцієнт потужності вертикального рушія, а виходом регулятора маршового руху – коефіцієнт потужності спільної роботи маршових двигунів.

Для стабілізації курсу використовується нечіткий ПД регулятор, виходом якого є коефіцієнт різниці потужності між маршовими двигунами.

Новизна розробленої системи керування зумовлена динамічним розподіленням сигналу керування для маршових рушіїв між його маршовим і поворотним рухом.

Така система керування рухом призначена як складова частина нижнього рівня трирівневої ієрархічної системи керування підводних апаратів пошукового типу і використовується для задач стабілізації на траєкторії або в точці.

Ключові слова: нечітка логіка; регулятор курсу; регулятор поступальної швидкості.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для моніторингу підводної обстановки добре себе зарекомендувало застосування безекіпажних підводних апаратів (далі – ПА). Моніторинг підводної обстановки охоплює великі площі, що ставить певні вимоги для підводних апаратів.

Самохідні пошукові та інспекційні підводні апарати зазвичай мають велику маршову швидкість для швидкого руху по акваторії, тому основними споживачами енергії є маршові двигуни [1]. Виходячи з цього, більша частина пошукових апаратів має рушійно-кермовий комплекс (РКК), що складається з одного вертикального та двох маршових рушіїв. Така система дає змогу маневрувати в горизонтальній площині за допомогою різності упорів на рушіях, а також використовувати максимальну потужність горизонтальних рушіїв на прямих ділянках маршруту.

Складністю керування таким РКК є необхідність оптимального розподілення сигналів керування на маршові двигуни при одночасному русі з поворотом, тому що маршовий рух і поворот забезпечується одними й тими самими виконавчими механізмами.

Одним із прикладів використання такого типу РКК є автономний підводний апарат із радіобуєм, призначений для моніторингу мілководних акваторій [2]. Вибір такого РКК зумовлений вимогами до його габаритних показників та автономності роботи.

Під час моніторингу підводної обстановки в пошукових цілях або інспекції великої площі виникає необхідність керувати саме швидкістю руху апарата, а також його курсом. До таких режимів роботи належить уникнення зіткнень із рухомими об'єктами, сканування донної поверхні гідролокаторами бічного огляду, пошук засобами відеоспостереження тощо. Таким чином, виникає необхідність розробки системи автоматичного керування, що зможе задовольнити ці потреби.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз останніх публікацій показує, що для систем автоматичного керування рухом підводних апаратів ставиться задача стабілізації однієї [3–5] або декількох координат [6].

Використання лінійних ПІД регуляторів навіть із нечіткими коефіцієнтами мають великий час переходного процесу [4–8], тому при спільній роботі регуляторів можливі великі затримки.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Здебільшого для системи автоматичного керування рухом підводного апарата забезпечують стабілізацію однієї вихідної величини для одного або декількох виконавчих механізмів, а задачі стабілізації двох або більше вхідних величин одним виконавчим механізмом вимагає більш складної реалізації та визначення пріоритетних задач.

Задачею розробленої системи автоматичного керування рухом є стабілізація курсу та маршової швидкості, яка забезпечується двома маршовими рушіями. Для виконання цього завдання, окрім регуляторів стабілізації курсу та маршової швидкості, необхідно розробити регулятор розподілення потужності двигунів із динамічним розподіленням пріоритету між цими задачами. Система керування рухом повинна забезпечувати високі показники якості як при одиночній роботі, так і при спільній роботі обох регуляторів одночасно.

Метою роботи є розробка системи автоматичного керування рухом для АПА РБ, до складу РКК якого входить один вертикальний і два маршові рушії, на основі нечіткої логіки, яка реалізує динамічне розподілення потужності між задачами повороту та стабілізації маршової швидкості, що забезпечує використання повної потужності двигунів на маршовий рух при встановленому заданому курсі.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як об'єкт дослідження обрано автономний підводний апарат із радіобуєм, призначений для моніторингу підводної обстановки на мілководних акваторіях.

Предмет дослідження – система керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата, яка розподіляє упори маршових рушіїв для задач стабілізації курсу та швидкості. Синтез регуляторів для стабілізації курсу та швидкості синтезовано на основі нечіткої логіки.

Дослідження проводиться *методом* математичного моделювання на основі стимулятора руху АПА РБ, що створено в *MatLabSimulink*, математична модель якого представлена у [9; 10].

Основний матеріал

Структура системи автоматичного керування рухом АПА РБ (рис. 1) включає два регулятори поступового руху (маршового (МШ) та вертикального (ВШ)), регулятор курсу (РК) і блок розподілення потужності (РП).

Рис. 1. Структура системи САК РПА

Розроблена система керування є складовою частиною тривірневої ієрархічної системи автоматичного керування [11]. Таким чином, задачею системи

автоматичного керування рухом є стабілізація маршової та вертикальної швидкості АПА РБ, а також його курсу. Виникає необхідність синтезу регуляторів поступального руху та кутової орієнтації.

Блок розподілення навантаження слугує для розподілення сигналу керування між елементами РКК. Сигнал керування вертикальним двигуном p_{VB} передається без змін, а спільний сигнал керування маршовими двигунами p_{VM} та різносторонній $-p_{VM}$ необхідно корегувати, якщо їх сума більша за максимальний сигнал керування. Насамперед при розподіленні напруги на маршові двигуни більш пріоритетними задачами є стабілізація курсу. Таким чином, вихідний вектор керування матиме вигляд:

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

де U_{max} – номінальна напруга двигунів.

Для забезпечення стабілізації поступальної швидкості (СПШ) (маршової та вертикальної) використовується ПІ регулятор на базі нечіткої логіки [12]. Його терми представлені на рис. 2 у графічному вигляді.

База правил регулятора представлена у вигляді табл. 1.

Таблиця 1. База правил нечіткого регулятора СПШ

$\epsilon_v \backslash i\epsilon_v$	NB	N	Z	P	PB
N	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
P	P	Z	N	NB	NB

Рис. 2. Терми нечіткого регулятора стабілізації поступальної швидкості а) похибка; б) інтеграл похибки; в) вихідний сигнал

Регулятор стабілізації швидкості працює для встановлення як вертикальної, так і маршової швидкості АПА РБ. Перехідні процеси роботи регулятора представлені на рис. 3.

Показники якості перехідного процесу представлені у табл. 2.

Таблиця 2. Показники якості роботи регулятора

№	Показник	Вертикальний		Маршовий	
		const	var	const	var
1.	Початкове відхилення, м/с	0,45	0,1	1	0,2
2.	Час перехідного процесу, с	2,5	1,5	1,5	1,2
3.	Статична похибка, м/с	0,001	0,001	0,001	0,001
4.	Перерегулювання, %	0	5	3,8	7

Для стабілізації курсу використовується нечіткий ПД регулятор (рис. 4).

База правил регулятора курсу представлена в вигляді табл. 3.

Таблиця 3. База правил нечіткого регулятора

$d\epsilon_a$ \ ϵ_a	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 РК знімаємо перехідні процеси при сталому та змінному входньому сигналі (рис. 5).

Показники якості регулятора курсу без поступального руху (табл. 4).

а)

б)

в)

г)

----- задане значення; — діюче значення

Рис. 3. Перехідні процеси стабілізації швидкості: а) вертикальний рух із постійною швидкістю; б) вертикальний рух зі змінною швидкістю; в) маршовий рух із постійною швидкістю; г) маршовий рух зі змінною швидкістю

Рис. 4. Терми нечіткого регулятора курсу: а) похибка; б) диференціал похибки; в) вихідний сигнал

Рис. 5. Перехідні процеси стабілізації курсу: а) $\alpha_0 = \text{const}$; б) $\alpha_0 = \text{var}$

Таблиця 4. Показники якості роботи регулятора

№	Показник	const	var
1.	Початкове відхилення, град	20	5
2.	Час перехідного процесу, с	2,75	0,75
3.	Статична похибка, град	відсутня	відсутня
4.	Перерегулювання, %	0	5
5.	Запізнювання, с	-	0,15

При спільній роботі всіх регуляторів перехідні процеси набудуть вигляду (рис. 6).

Показники якості при спільній роботі всіх регуляторів зведено в табл. 5.

Таблиця 5. Показники якості при спільній роботі

№	Показник	МШ	ВШ	РК
1.	Початкове відхилення	1 м/с	-0,45 м/с	20 град
2.	Час перехідного процесу, с	3	3,5	2,2
3.	Статична похибка	0,001 м/с	0,001 м/с	відсутня
4.	Перерегулювання, %	2,5	6	3

Результати. Удосконалення системи керування рухом дає можливість використання повної потужнос-

Рис. 6. Перехідні процеси роботи системи автоматичного керування рухом АПА РБ а) регулятор маршової швидкості; б) регулятор вертикальної швидкості в) регулятор курсу

ті маршових двигунів для задач повороту та виконання маршового руху підводного апарата. Це досягається розподіленням сигналу керування таким чином, що при перевищенні сигналу керування відбувається пріоритетний розподіл із перевагою повороту апарата, а нечіткі регулятори забезпечують основні задачі руху. Реалізація керування за пріоритетами збільшує загальну швидкість системи автоматичного керування при завданні одночасного встановлення маршової швидкості та курсу порівняно з сумою часу стабілізації окремо курсу та швидкості.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблена система керування рухом автономного підводного апарата має високу швидкість (не перевищує 3,5 с), що справедливо навіть при одночасній роботі усіх регуляторів. Наявність статичної похибки при поступальній швидкості зумовлена наявністю нечіткого нуля в регуляторах. Така статична похибка є невеликою, тому нею можна знехтувати.

При спільній роботі регуляторів показники якості змінилися несуттєво. Збільшення часу перехідного процесу стабілізації маршової швидкості зумовлено пріоритетною задачею стабілізації курсу, а збільшен-

ня часу перехідного процесу стабілізації вертикальної швидкості – наявністю обертової швидкості разом із маршовою, що впливає на динаміку прискорення по вертикальній осі апарата [9].

ВИСНОВКИ

У розробленій системі керування рухом підводного апарату вперше застосовано динамічний розподіл сигналів керування маршовими двигунами з використанням пріоритетності завдань маршового руху та встановлення курсу. Таким чином, встановлено зв'язок між окремими регуляторами маршової швидкості та стабілізації курсу без окремого незмінного розподілення часток потужності маршових приводів на кожне з цих завдань, що дає змогу при встановленому курсі використовувати маршові двигуни на повну потужність. Загальний час перехідного процесу зменшується внаслідок початку розгону маршового руху за наявності не споживаної частки потужності маршових двигунів при стабілізації курсу.

Надалі ця система буде використовуватися як виконавчий рівень ієрархічної системи автоматичного керування моніторингу підводної обстановки.

REFERENCES

- [1] Blintsov, V.S., Magula, V.E. (1997). *Proektirovanie samohodnykh privyaznykh podvodnykh sistem* [Design of self-propelled underwater systems]. Kiev: Naukova dumka, 140 [in Ukrainian].
- [2] 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.
- [3] Abdullah, S.S., Marizan Sulaiman, Mohd Shahrriel Mohd Aras (2016). Fuzzy logic controller for depth control of underwater remotely operated vehicle. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 91 (2), 275–288.
- [4] Zhijie Tang, LuoJun, Qingbo He (2010). A Fuzzy-PID Depth Control Method with overshoot Suppression for Underwater Vehicle. *International Conference on Life System Modeling and Simulation and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment*, 6329. 218–224.
- [5] Blintsov, S.V., Fuk Tkhy Doan (2013). Avtomatyzatsiia keruvannia pidvodnym aparatom v umovakh nevyznachenosti yoho parametriv [Automation control underwater vehicle in uncertainty of its parameters]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia*, 4, 89–93.
- [6] Rúa, S., Vázquez, R.E. (2016). Development of a low-level control system for the ROV Visor3. *International Journal of Navigation and Observation*, 1 (70), 12.
- [7] Darshana Makavita, Hung Duc Nguyen, Dev Ranmuthugala (2014). Fuzzy Gain Scheduling Based Optimally Tuned PID Controllers for an Unmanned Underwater Vehicle, *International Journal of Conceptions on Electronics and Communication Engineering*, 2, 7–13.
- [8] Govinda, Luis, Tomas, Salgado, Bandala, Manuel, Nava Balanzar, Luciano, Hernandez-Alvarado, Rodrigo, Antonio, Jose. (2014). Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 11. 1. 10.5772/56810.
- [9] Blinczov, O.V., Nadtochij, V.A., (2014). *Avtomatyzatsiia keruvannia odnolankovymy samohidnymy pryvyaznymy pidvodnymy systemamy* [Automation of management odnolankovymy propelled tethered under water systems]. Navchalnyj posibnyk, Mykolayiv: Nacionalnyj universytet korablebuduvannia, [in Ukrainian].
- [10] Sirivchuk, A.S. (2019). *Rozrobka matematychnoyi modeli avtonomnogo pidvodnogo aparata z radiobuem* [Development of a mathematical model of autonomous underwater vehicle radiobuem], *Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologiyi na transporti: materialy IX Mizhnarodnoyi nauko-vo-praktychnoyi konferenciyi*, 279–282.
- [11] Blinczov, V.S., Sirivchuk, A.S. (2017). Suchasni zadachi avtomatyzatsiyi keruvannia avtonomnym nenaselenym pidvodnym aparatom z radiobuem [Modern tasks of automation control for the autonomous uninhabited underwater vehicle with a radiobeacon]. *Zbirnyk naukovykh prac Nacionalnogo universytetu korablebuduvannia*, 3 (470), 56–62
- [12] Leonenko, A.V. (2005). *Nechetkoe modelirovanie v brede MATLAB i fuzzy TECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH delusions]. SPb.: BVH-Peterburg, 736 [in Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Блинцов В.С., Магула В.Э. (1997). Проектирование самоходных привязных подводных систем. Киев : Наукова думка. 140 с.
- [2] 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.
- [3] Abdullah, S.S., Marizan Sulaiman, Mohd Shahrriel Mohd Aras (2016). Fuzzy logic controller for depth control of underwater remotely operated vehicle. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 91 (2), 275–288.
- [4] Zhijie Tang, LuoJun, Qingbo He. (2010). A Fuzzy-PID Depth Control Method with overshoot Suppression for Underwater Vehicle. *International Conference on Life System Modeling and Simulation and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment (LSMS/ICSEE)*, 6329. 218–224.
- [5] Блінцов С.В., Фук Тхи Доан (2013). Автоматизація керування підводним апаратом в умовах невизначеності його параметрів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. № 4. С. 89–93, URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2013_4_18.
- [6] Rúa, S., Vázquez, R.E. (2016). Development of a low-level control system for the ROV Visor3. *International Journal of Navigation and Observation*, 1 (70), 12.
- [7] Darshana Makavita, Hung Duc Nguyen, Dev Ranmuthugala (2014). Fuzzy Gain Scheduling Based Optimally Tuned PID Controllers for an Unmanned Underwater Vehicle, *International Journal of Conceptions on Electronics and Communication Engineering*, 2, 7–13.
- [8] Govinda, Luis, Tomas, Salgado, Bandala, Manuel, Nava Balanzar, Luciano, Hernandez-Alvarado, Rodrigo, Antonio, Jose. (2014). Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 11. 1. 10.5772/56810.
- [9] Блінцов О.В., Надточий В.А. (2014). Автоматизація керування одно ланковими самохідними прив'язними підводними системами : навчальний посібник. Миколаїв : Національний університет кораблебудування.
- [10] Сірівчук А.С. (2019). Розробка математичної моделі автономного підводного апарата з радіобуєм. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. С. 279–282.
- [11] Блінцов В.С., Сірівчук А.С. (2017). Сучасні задачі автоматизації керування автономним нenasеленим підводним апаратом з радіобуєм. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. № 3 (470). С. 56–62.
- [12] Леоненко А.В. (2005). *Нечеткое моделирование в бреде MATLAB и fuzzy TECH*. Санкт-Петербург : БВХ-Петербург. 736 с.