DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).17](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).17)
УДК 629.58: 681.5

DEVELOPMENT OF SYSTEM OF STABILIZING OF PITCH OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WITH A RADIO BEACON

РОЗРОБКА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИФЕРЕНТУ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ

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

А. С. Сірівчук,
старший викладач

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

Abstract. Autonomous Underwater Vehicles with radio buoy have gained significant perspective of underwater vehicles for work in shallow waters. The use of autonomous underwater vehicles in shallow water requires certain mass-dimension and performance indicators of such machines. During towing of radio beams causes intense external deviation in the form of a significant apparatus trim. The main purpose of the article is development a complex approach to stabilizing the trim of an autonomous submarine with a radio buoy, which includes reducing external perturbations by releasing the optimum length for cable-tug and stabilizing the trim by horizontal rudders. The mathematical modeling determined the dependence of the optimal length of the tow cable on the immersion depth of the autonomous submarine. The optimum cable-tug length regulator has been designed based on fuzzy logic, which not only eliminates the cable-tug condition error, but also provides stability in different vertical movement modes. Also the stern rudders are used to stabilize trim of the apparatus. The horizontal wings rotate in the direction of motion of the autonomous submarine to reduce their own negative perturbation, and then set the deviation from this angle to create a moment of stabilization. The controller uses fuzzy logic to establish the deviation. The simulation results showed quite good quality of indicators of the developed control system in three modes of movement: marching, vertical and common.

Key words: optimal length of cable-tow; horizontal rudders; control of cable winch.

Анотація. Автономні підводні апарати з радіобуєм є перспективним видом підводної техніки під час роботи на мілководних акваторіях. Використання підводних апаратів на мілководді висуває низку вимог до їх масогабаритних та експлуатаційних показників. Необхідність буксирування радіобуя спричиняє зовнішні збурення, які значно впливають на рух апарата, а саме приводить до появи значного диференту. Метою статті є розроблення комплексного підходу до стабілізації диференту автономного підводного апарата з радіобуєм, що включає зменшення зовнішніх збурень шляхом випускання оптимальної довжини кабель-буксира та стабілізацію диференту за допомогою горизонтальних рулів. Шляхом математичного моделювання визначено залежність оптимальної довжини кабель-буксира від глибини занурення автономного підводного апарата. Розроблено регулятор оптимальної довжини кабель-буксира на основі нечіткої логіки, який дає змогу не тільки усувати похибку стану випущеної довжини кабель-буксира, але й забезпечувати стійкість у різних режимах вертикального руху. Для стабілізації диференту застосовуються кормові горизонтальні рулі. Горизонтальні рулі повертаються в напрямку руху автономного підводного апарата для зменшення власного негативного збурення, а потім встановлюють відхилення від цього кута для створення моменту стабілізації. Для встановлення відхилення використовується регулятор на базі нечіткої логіки. Результати моделювання продемонстрували високі показники якості розробленої системи керування в трьох режимах руху, а саме маршовому, вертикальному та комбінованому.

Ключові слова: оптимальна довжина кабель-буксира; горизонтальні рулі; керування кабельною лебідкою.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Одним з новітніх засобів моніторингу мілководних акваторій у режимі реального часу є автономні підводні апарати з радіобуєм (АПА-РБ) [1]. Мілководдя накладає певні обмеження на технічні характеристики, які висуваються до апаратів цього типу. Перш за все це масогабаритні характеристики самого

АПА-РБ, оскільки невеликі глибини не дають змогу застосовувати підводні апарати середнього та важкого класів, а також ускладнюють використання судноносія для таких апаратів.

Обмеження в масогабаритних характеристиках впливає безпосередньо на кількість акумуляторних батарей, що можна встановити на АПА. Таким чином,

виникає необхідність оптимізації рушійно-кормового комплексу (РКК), оскільки він є найбільш потужним споживачем енергії.

Для апаратів пошукового та інспекційного типів найбільш оптимальною є структура РКК, що включає один вертикальний рушій, упор якого проходить через центр мас АПА, та два маршових рушії, розташованих у горизонтальній площині АПА, що забезпечують маршовий рух і маневрування в горизонтальній площині. Така конструкція РКК має три керовані ступеня вільності, що можуть повністю забезпечити необхідне переміщення АПА-РБ, при цьому має найменшу кількість електродвигунів.

Основною проблемою використання цієї конструкції РКК є неможливість з'єднання кабель-буксира (КБ) із центром мас АПА, в результаті чого під час руху апарата виникає диференційований момент, що негативно впливає на якість керування. Таким чином, без допоміжних стабілізаторів диференту неможливо отримати якісне керування апаратом навіть на невеликих швидкостях.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для стабілізації диференту підводних рухомих об'єктів застосовується декілька способів як спільно, так і окремо. Першим способом стабілізації кутového положення є конструктивні рішення, які передбачають розміщення важких елементів у нижній частині АПА. Це дає змогу розмежувати центр мас апарата та центр плавучості, що забезпечить відновлення горизонтального положення апарата внаслідок різниці дій сили тяжіння й сили плавучості за появи крену або диференту [2–4]. Цей спосіб є ефективним за невеликих моментів дії на корпус АПА-РБ, а відновлювальна сила не може бути керованою та збільшується лише за збільшення відхилення від горизонтального положення.

Другим способом є стабілізація диференту за рахунок встановлення системи динамічної зміни плавучості [5]. Така методологія перш за все приведе до значного збільшення габаритних показників апарата.

Третім способом динамічної зміни диференту є використання підрулюючих пристроїв, що розташовані в носовій та кормовій частинах апарата [2; 6; 7]. Така конструкція РКК збільшить не тільки габарити АПА, але й енергоспоживання самого АПА-РБ.

Для керування диференту в буксирувальних підводних апаратах, а також у сучасних підводних човнах застосовуються горизонтальні рулі [8; 9]. Така методологія є перспективною для використання в АПА-РБ, оскільки вона передбачає енерговитрати лише в перехідних станах руху.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Буксирування радіобуя під час роботи автономного підводного апарата дає значні зовнішні збурення, що

створюють великий диференційований момент, особливо під час швидкого руху апарата. Застосування радіобуя постійно в надводному положенні обумовлює необхідність розроблення спеціальних технічних рішень для компенсації диференційованого моменту, які б не вимагали високих енерговитрат під час їх функціонування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є синтез системи стабілізації диференту АПА-РБ у складі регулятора оптимальної довжини попущеної частини КБ та регулятора кормових горизонтальних рулів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як об'єкт дослідження вибрано автономний підводний апарат з кріпленням КБ у кормовій частині, радіобуй якого буксирується в поверхневому шарі води (рис. 1).

Рис. 1. Структура АПА-РБ

Предметом дослідження є система стабілізації диференту АПА на основі двох регуляторів, таких як регулятор оптимальної довжини КБ та регулятор кормових горизонтальних рулів.

Дослідження проводилося методом математичного моделювання, що описаний у роботах [10; 11]. Для збільшення достовірності роботи руля затримка його повороту забезпечується передаточною ланкою першого порядку.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Поява диференту обумовлена силою натягу КБ під час руху АПА. Таким чином, для ефективної стабілізації диференту необхідно забезпечити найменший можливий вплив від КБ, а надлишок цього зовнішнього збурення слід компенсувати поворотом кормових горизонтальних рулів.

Зменшення впливу КБ на систему АПА-РБ пропонується реалізувати шляхом випускання оптимальної (за критерієм сили гідродинамічного опору [12]) довжини КБ. Для виявлення оптимальної довжини КБ проведено моделювання залежності сили натягу

Рис. 2. Залежність сили натягу КБ під час горизонтального руху:

 а) $v_x = 0,75$, $h = 10$; б) $v_x = 0,1$, $h = 10$;
 в) $v_x = 0,75$, $h = 5$; г) $v_x = 0,75$, $h = 15$

Рис. 3. Регулятор довжини кабель-буксира

КБ від відношення довжини випущеної частини на глибину занурення (рис. 2).

Як видно з побудованих графіків, оптимальна довжина КБ за зміни глибини або швидкості набігаючого потоку змінюється в невеликих межах. Отже, можна сказати, що оптимальна довжина КБ за квазістаціонарного руху буде складати $L_{\text{опт}} = 2,3h$.

Регулятор оптимальної довжини КБ (рис. 3) повинен не тільки видавати оптимальну довжину в режимі квазістаціонарного руху, але й змінювати довжину КБ під час зміни глибини занурення.

Перш за все оптимальна довжина $L_{\text{опт}}$ КБ залежить від глибини занурення h , тому, як було сказано вище, коефіцієнт підсилення $k_{\text{опт}} = 2,3$. Після порівняння оптимальної та поточної довжин КБ помилка передається на нечіткий регулятор (рис. 4). Крім того, для більш точної роботи на нього також передається вертикальна швидкість АПА v_y .

База правил для нечіткого регулятора подана у вигляді табл. 1.

Після виходу з нечіткого регулятора сигнал підсилюється на величину k_ϵ . Цей коефіцієнт вибирається

Таблиця 1. База правил нечіткого регулятора оптимальної довжини КБ

$v_y \epsilon L$	NB	N	Z	P	PB
N	NB	NB	Z	P	P
Z	NB	N	Z	P	PB
P	N	N	Z	PB	PB

таким, що дорівнює номінальній швидкості обертання двигуна.

Для підвищення швидкодії регулятора під час зміни глибини занурення вводиться додатковий контур, що випускає КБ під час вертикального руху АПА. Цей контур на вході має вертикальну швидкість АПА, підсилену коефіцієнтом k_6 . Цей коефіцієнт розраховується за такою формулою:

$$k_6 = \frac{2,3K}{R},$$

де K – передаточне число редуктора барабана; R – радіус барабана.

Рис. 4. Терми нечіткого регулятора:

а) похибка випущеної частини КБ; б) швидкість занурення; в) устанавлення швидкості обертання

Рис. 5. Робота регулятора оптимальної довжини випущеної частини КБ:

а) $v_y = 0$; б) $v_y = -0,25$ м/с; в) $v_y = 0,25$ м/с; г) v_y – синусоїдальної форми з амплітудою 0,5 м/с;

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

Таблиця 2. Показники якості регулятора оптимальної довжини КБ

№	Показник	v_y			
		0	-0,25	0,25	Синусоїдальний
1	Початкове відхилення, м	1,2	1,0	1,0	1,0
2	Час перехідного процесу, с	0,90	0,90	0,48	0,50
3	Статична похибка, м	0,03	0,03	0,03	0,03
4	Перерегулювання, %	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє

Для керування двигуном постійного струму з незалежним збудженням використовується лінійний ПІД-регулятор.

Результати роботи регулятора оптимальної довжини КБ наведено на рис. 5.

Показники якості регулятора оптимальної довжини КБ зведено в табл. 2.

Горизонтальні рулі АПА-РБ повинні забезпечувати стабілізацію диференту в трьох основних режимах руху, а саме вертикальному, горизонтальному та спільному.

Оскільки горизонтальні рулі також створюють диференційований момент, особливо під час вертикального руху, необхідно забезпечити перш за все мінімальний вплив руля на рух АПА-РБ, а потім відхиленням від заданої позиції забезпечити стабілізуючий момент (рис. 6).

Для встановлення руля назустріч набігаючому потоку ($\alpha_{ш}$) використовується блок «Регулятор напрямку», що працює за такою залежністю:

$$\pm_{ш} = \begin{cases} 0, & \text{при } v_y \neq 0 \quad \text{і } v_x \neq 0; \\ -\arctg \frac{v_y}{v_x}, & \text{при } v_y \neq 0 \text{ або } v_x \neq 0, \end{cases}$$

де v_x – маршова швидкість АПА-РБ.

Для забезпечення моменту стабілізації диференту використовується нечіткий ПІД-регулятор. Структура термів нечіткого регулятора подана на рис. 7.

База правил для нечіткого регулятора наведена у вигляді табл. 3.

Для усунення статичної похибки встановлюється додатковий інтегральний контур, де коефіцієнт k_I визначається емпіричним шляхом.

Залежно від напрямку маршового руху АПА-РБ встановлюється коригуючий коефіцієнт k_a , який визначається за такою формулою:

$$k_a = \begin{cases} 1, & \text{при } v_x = 0; \\ \frac{v_x}{|v_x|}, & \text{при } v_x \neq 0. \end{cases}$$

Перевірка працездатності системи була проведена методом математичного моделювання в трьох режимах руху (рис. 8).

Таблиця 3. База правил нечіткого регулятора стабілізатора диференту

$\psi \backslash \frac{d\psi}{dt}$	NB	N	Z	P	PB
N	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
P	P	Z	N	NB	NB

Рис. 6. Структура регулятора горизонтальних рулів

Показники якості роботи стабілізатора диференту АПА-РБ зведено в табл. 4.

Результати моделювання стабілізатора диференту показують його високу ефективність і можливість роботи в трьох режимах руху, при цьому максимальне відхилення від горизонтальної площини не перевищує 3 градусів. Таким чином, похибка направленості дії рушіїв апарата не перевищить 5,2%. Таке відхилення обумовлене часом, який необхідно подолати сервоприводу руля для встановлення в задане положення.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі проведено аналіз залежності оптимальної довжини КБ від глибини занурення, а також визначено, що вона є лінійною та має коефіцієнт 2,3, що дає більш точний результат, на відміну від [7].

Використання горизонтальних кормових рулів одночасно зі встановленням оптимальної за критерієм мінімуму сили гідродинамічного опору довжини випущеної довжини КБ дає змогу повністю стабілізувати диферент у всіх режимах руху АПА-РБ.

Таблиця 4. Показники якості регулятора стабілізатора диференту

№	Показник	Маршовий	Вертикальний	Спільний
1	Початкове відхилення руля від напрямку потоку, град	0	90	40
2	Час перехідного процесу, с	0	8	5
3	Статична похибка, м	Відсутня	Відсутня	Відсутня
4	Максимальне відхилення, град	$6 \cdot 10^{-6}$	3	2,62

Рис. 7. Терми нечіткого регулятора горизонтальних рулів:

а) вхідний терм диференту; б) вхідний терм похідної диференту; в) вихідний терм

Рис. 8. Робота регулятора стабілізації диференту під час роботи двигунів на повну потужність:

а) маршовий рух; б) вертикальний рух; в) спільний

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки.

1) Розглянуто способи стабілізації диференту підводної техніки, обґрунтовано оптимальність застосування горизонтальних рулів для забезпечення стабілізації диференту в автономних підводних апаратах з радіобуєм.

2) Методом математичного моделювання синтезовано залежність оптимальної довжини кабель-буксира від глибини занурення, а шляхом застосування нечіткої логіки синтезовано нечіткий регулятор оптимальної довжини кабель-буксира, який забезпечує не тільки усунення похибки на початко-

вій стадії руху системи, але й динамічну стійкість під час вертикального руху апарата. Використання регулятора оптимальної довжини кабель-буксира в складі системи стабілізації диференту значно зменшує вплив кабель-буксира на автономний підводний апарат, що дає змогу застосовувати рулі з меншою площею.

3) Для компенсації диференційованого моменту апарата було синтезовано нечіткий регулятор кута повороту рулів, який за перехідних режимів забезпечує незначне максимальне відхилення від горизонтальної площини. Отже, за зміни режиму руху апарата його похибка, спричинена диферентом, не перевищує 5,2%.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Louis Andrew Gonzalez (2004). Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle. *Bachelor of Engineering Honours Thesis*. Retrieved from <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2004-AUV-Gonzalez.pdf>.
- [3] Pyishnev, S.N., Chang-li, Yu, & Danilchenko, I.E. (2018). Metod stabilizatsii postupatel'nogo dvizheniya podvodnogo apparata [Method for stabilizing the translational movement of a underwater vehicle]. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 21. Retrieved from: <https://seanewdim.com/uploads/3/4/5/1/34511564/httpsdoi.org10.31174send-nt2018-179vi21-17.pdf> [in Russian].
- [4] Song, Y.S., & Arshad, M.R. (2015). Passive hydrostatic stability design of a box-shaped autonomous underwater vehicle. *2015 IEEE international symposium on robotics and intelligent sensors*, 180–185. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915038387>.
- [5] Goy, V.A., & Kostenko, V.V. (2016). Regulirovanie plavuchesti i differenta avtonomnogo podvodnogo robota [Autonomous underwater robot buoyancy and pitch control]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 1 (21), 4–14. Retrieved from: <http://jmtf.febas.ru/journal/1-21-2016/4-14.pdf> [in Russian].
- [6] Blinczov, V.S., & Vojtasyk, A.M. (2017). Suchasni zadachi avtomatichnogo keruvannya samoxidnoyu pryvyaznoyu pidvodnoyu vantazhnoyu systemoyu [Modern tasks of automatic control of a self-propelled tethered underwater cargo system]. *Zbirnyk naukovykh prac NUK* [Collection of scientific works of NUS], 3, 49–55 [in Ukrainian].
- [7] Kostenko, V.V., & Lvov, O.Yu. (2017). Kombinirovannaya sistema svyazi i navigatsii avtonomnogo podvodnogo robota s poplavkovym modulem [Combined communication and navigation system of an autonomous underwater robot with a float module]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 1 (23), 31–43 [in Russian].
- [8] Egorov, V.I. (1981). *Podvodnyye buksiruemye sistemy* [Underwater towing systems]. Leningrad : Sudostroenie [in Russian].
- [9] Korol, A.V. *Dvizhenie podvodnoy lodki v vertikal'noy ploskosti pri perekladke gorizontalnykh ruley* [The movement of the submarine in the vertical plane with the relaying of hydroplanes]. Retrieved from: <https://podlodka.info/education/34-the-theory-of-submarine/358-the-movement-of-the-submarine-in-the-vertical-plane-with-the-relaying-of-hydroplanes.html> [in Russian].
- [10] Blinczov, O.V., & Nadtochij, V.A. (2014). *Avtomatyzaciya keruvannya odno lankovymy samoxidnymy pryvyaznymy pidvodnymy systemamy*. Navchalnyj posibnyk [Automation of control of single-line self-propelled mooring systems. Tutorial]. Mykolayiv: Nacionalnyj universytet korablebuduvannya [National University of Shipbuilding] [in Ukrainian].
- [11] Sirivchuk, A.S. (2019). Rozrobka matematichnoyi modeli avtonomnogo pidvodnogo aparata z radiobuym [Development of a mathematical model of autonomous underwater vehicle radiobuym]. *Suchasni informacijni ta innovacijni tekhnologiyi na transporti: materialy IX Mizhnarodnoyi nauko-vo-prakty'chnoyi konferenciji* [Modern information and innovative technologies in transport: materials of the IX International scientific-practical conference], 279–282 [in Ukrainian].
- [12] Blintsov, O.V. (2016). Optyimizatsiya dovzhyny kabel'-trosa pry keruvanni rukhom pryv'yaznogo telekovanoho pidvodnogo aparata. Visnyk NTU "KHPI". Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekсы [Optimization of cable length when controlling the movement of a tethered submarine]. *Visnyk NTU "KHPI". Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekсы* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes], 49 (1221), 18–24 [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Blintsov V., Maidaniuk P., Sirivchuk A. Improvement of technical supply of projects of robotized monitoring of underwater conditions in shallow water areas. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. № 3. С. 41–49.
- [2] Gonzalez L.A. Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle. *Bachelor of Engineering Honours Thesis*. 2004. URL: <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2004-AUV-Gonzalez.pdf>.
- [3] Пышнев С.Н., Чанг-ли Ю., Данильченко И.Е. Метод стабилизации поступательного движения подводного аппарата. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2018. № 21. URL: <https://seanewdim.com/uploads/3/4/5/1/34511564/httpsdoi.org10.31174send-nt2018-179vi21-17.pdf>.

- [4] Song Y.S., Arshad M.R. Passive hydrostatic stability design of a box-shaped autonomous underwater vehicle. *2015 IEEE international symposium on robotics and intelligent sensors*. 2015. P. 180–185. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915038387>.
- [5] Гой В.А., Костенко В.В. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота. *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 1 (21). URL: <http://jmtп.febras.ru/journal/1-21-2016/4-14.pdf>.
- [6] Блінцов В.С., Войтасик А.М. Сучасні задачі автоматичного керування самохідною прив'язною підводною вантажною системою. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 3. С. 49–55.
- [7] Костенко В.В., Львов О.Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем. *Подводные исследования и робототехника*. 2017. № 1 (23). С. 31–43.
- [8] Егоров В.И. Подводные буксируемые системы : учебное пособие. Ленинград : Судостроение, 1981.
- [9] Король А.В. Движение подводной лодки в вертикальной плоскости при перекладке горизонтальных рулей. URL: <https://podlodka.info/education/34-the-theory-of-submarine/358-the-movement-of-the-submarine-in-the-vertical-plane-with-the-relaying-of-hydroplanes.html>.
- [10] Блінцов О.В., Надточій В.А. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами : навчальний посібник. Миколаїв : Національний університет кораблебудування, 2014.
- [11] Сірівчук А.С. Розробка математичної моделі автономного підводного апарата з радіобуєм. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті* : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. 2019. С. 279–282.
- [12] Блінцов О.В. Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2016. № 49 (1221), С. 18–24.