

5. Service Letter SL2019-687/NHN Available at: [https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019\\_687.pdf?sfvrsn=4fba319\\_6](https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019_687.pdf?sfvrsn=4fba319_6) (accessed 25 November 2022).
6. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines Available at: [https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service\\_experience.pdf](https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service_experience.pdf) (accessed 01 February 2023).
7. Pohorletskyi D.S., Khudiakov I.V., Gritsuk I.V. Features of operation of the MAN - B&W 5S70ME-C marine engine lubrication system. Modern power plants in transport and technologies and equipment for their maintenance: proceedings of the 14-th Int. sci.-pract. conf. Kherson, 2023, pp. 402. (Ukr.)

Рецензент: Є.В. Білоусов  
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 05.05.2023

Стаття прийнята 13.06.2023

УДК 656.621

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288182

© Дубинець О.І.\*

#### РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПІДВОДНОГО РОБОТА НА МАЛИХ ГЛИБИНАХ

*Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних роботів на невеликих глибинах на основі комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана. Поставлена мета досягається шляхом визначення набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних роботів на основі комплексної обробки даних. У даному випадку фільтрація здійснюється за допомогою розподіленого набору фільтрів Калмана різної структури, які були підібрані з урахуванням характеристик оцінюваних даних. Встановлено, що на теперішній час підводні роботи на невеликих глибинах широко використовуються по всьому світу для різноманітних завдань, у тому числі пошукові операції та перевірки під водою. Однак експлуатація цих роботів характеризується складними умовами. Серед таких умов можна виділити невідомі параметри підводної навігації, вплив зовнішніх збурень, зміни маси, розмірів та гідродинамічних характеристик роботів під час роботи у воді. На теперішній час перспективним підходом до автоматизації управління рухомими об'єктами вважається концепція управління, що базується на інтелектуальних методах. Однак застосування таких регуляторів для підводних роботів разом із проблемами отримання актуальної навігаційної інформації ще не досягло достатньої ефективності. До того ж питання, пов'язані з розробкою системи обробки навігаційної інформації з використанням нелінійних фільтрів і створенням інтелектуальних регуляторів для підводних роботів, досі недостатньо висвітлені в науково-технічній літературі. Найбільш суттєвим результатом є отримання набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних роботів за допомогою набору розподілених фільтрів Калмана різної структури. Такі набори тісно корелюються з відповідними характеристиками оцінюваних даних. У цьому контексті інерційний модуль з алгоритмами фільтрації Калмана може використовуватись для вимірювання кутових параметрів руху та вирішення завдань стабілізації крену, диференту і рискання. У зв'язку з низькими швидкостями руху підводних роботів на невеликих глибинах і відсутністю високочастотних перешкод*

\* д-р технічних наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3270-1218

у вимірах датчика тиску, дані від нього можуть бути використані для визначення вертикальної швидкості.

**Ключові слова:** підводний робот, роботизований комплекс, малі глибини, навігаційна інформація, стабілізація, формалізація, фільтрація, теорія Калмана.

**O. Dubynets. Development of proposals for formalising the process of filtering navigation information of an underwater robot at shallow depths.** The purpose of the article is to increase the efficiency of solving the problems of stabilising underwater robots at shallow depths based on complex processing of navigation information and its filtering using the Kalman theory. This goal is achieved by defining a set of mathematical dependencies for formalising the process of filtering navigation information of underwater robots based on complex data processing. In this case, the filtering is carried out using a distributed set of Kalman filters of different structures, which were selected considering the characteristics of the data being evaluated. It has been established that at present, underwater robots at shallow depths are widely used around the world for various tasks, including search operations and underwater inspections. However, the operation of these robots is characterised by difficult conditions. These conditions include unknown parameters of underwater navigation, the impact of external disturbances, changes in the mass, size and hydrodynamic characteristics of robots while operating in water. Currently, the concept of control based on intelligent methods is considered a promising approach to automating the control of moving objects. However, the use of such controllers for underwater robots, together with the problems of obtaining up-to-date navigation information, has not yet achieved sufficient efficiency. In addition, the issues related to the development of a navigation information processing system using nonlinear filters and the creation of intelligent controllers for underwater robots are still insufficiently covered in the scientific and technical literature. The most significant result is a set of mathematical dependencies for formalising the process of filtering navigation information of underwater robots using a set of distributed Kalman filters of different structures. Such sets are closely correlated with the relevant characteristics of the data being evaluated. In this context, the inertial module with Kalman filtering algorithms can be used to measure angular motion parameters and solve the problems of roll, pitch and yaw stabilisation. Due to the low speeds of underwater robots at shallow depths and the absence of high-frequency interference in the pressure sensor measurements, the data from the pressure sensor can be used to determine the vertical speed.

**Key words:** underwater robot, robotic complex, shallow depths, navigation information, stabilisation, formalisation, filtering, Kalman theory.

**Постановка проблеми.** У теперішній час підводні роботи на невеликих глибинах (ПРНГ) широко використовуються у світі для різних завдань, таких як пошукові операції та перевірки під водою. Однак практичне застосування цих роботів супроводжується складними умовами експлуатації. До таких умов відносяться невідомі умови підводної навігації, вплив зовнішніх збурень, зміни маси і габаритів і гідродинамічних параметрів роботів у процесі роботи під водою.

У теперішній час перспективним підходом до автоматизації управління рухомими об'єктами є концепція управління, заснована на інтелектуальних методах. Однак можливості використання таких регуляторів для підводних роботів разом з проблемами отримання актуальної навігаційної інформації ще є недостатньо ефективними. При цьому питання, пов'язані з розробкою системи обробки навігаційної інформації з використанням нелінійних фільтрів і створенням інтелектуальних регуляторів для підводних роботів, ще недостатньо висвітлені у науково-технічній літературі. Тому дана тема статті є актуальною і вимагає подальших досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності управління підводними роботами, наприклад, які визначені в роботах [1-10].

Так, конструкція підводного робота, на відміну від інших типів апаратів, пов'язана з критичними проблемами управління через складне нелінійне управління силою і поворотами. У статті [1] був запропонований надійний підхід для ефективного управління поведінкою підводного робота з п'ятьма ступенями свободи. Крім того, розробляючи новий тип пари двигунів з можливістю обертання на 360 градусів разом із масовим перемикачем, це дає можливість роботу, який легко і

з мінімальними енергетичними витратами швидко змінює свою глибину, максимально зберігати свою рівновагу.

У статті [2] наведена ефективна система управління конструкцією автономних підводних роботів. Цей підхід використовує вбудовану оперативну пам'ять, а не бічну систему управління для більшої надійності, і нечіткий логічний контролер на основі мікроконтролера для кращої стабілізації балансування робота в міру його руху вперед. Цей підхід був реалізований разом з нечітким пропорційним інтегральним контролером в якості супервайзера і продемонстрований експериментально.

У роботі [3] розглядається BYSQ-2 – амфібійний сферичний дослідницький робот, здатний гнучко пересуватися у воді і по суші, має хорошу стійкість до тиску води і може здійснювати обертальні рухи з нульовим радіусом повороту. Але реальні результати експерименту показують, що недоліком робота є низька максимальна швидкість стрибка напруги. Основною метою даної статті є поліпшення максимальної швидкості стрибків напруги і зменшення коливань важкого маятника.

У статті [4] описана математична модель гідродинамічної сили для моделювання впливу стінки на здійснення точного управління і маневреності підводного робота складної форми. Представлена гідродинамічна модель робота для використання в басейні ядерної реакції, що містить не тільки гідродинамічні коефіцієнти, але і член гідродинамічної сили стінки, що часто ігнорувалося для роботів, що використовуються в морі. По-перше, гідродинамічні коефіцієнти в моделі, включаючи в'язкий та інерційний коефіцієнти, були вирішені шляхом моделювання стаціонарного і нестационарного руху з використанням обчислювальної гідродинаміки. Далі за допомогою обчислювальної гідродинаміки рідини була розрахована гідродинамічна сила стінки для різних швидкостей і відстаней від стіни, а також визначена сфера впливу стінки. Нарешті, гідродинамічні коефіцієнти були експериментально виміряні без настінного ефекту і з урахуванням настінної гідродинамічної сили при різних умовах в резервуарі з циркулюючою водою. Результат продемонстрував точність гідродинамічного розрахунку з використанням обчислювальної гідродинаміки та підтвердив надійність гідродинамічної математичної моделі.

Метою статті [5] є огляд сучасних розробок в області підводної робототехніки щодо використання штучного інтелекту, особливо в навчанні моделей, управлінні роботами, сприйнятті і навігації, маніпулюванні ними.

У роботі [6] наведений огляд актуальних проблем підводної робототехніки в різних аспектах (проекування систем, комунікації, машинне навчання, картографування і координація, адаптивне планування місій), а також інформація про наступне покоління підводних роботів.

Але всі наведені джерела не містять підходів щодо комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана для підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних роботів на невеликих глибинах.

**Метою статті** є підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних роботів на невеликих глибинах на основі комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана.

**Виклад основного матеріалу.** ПРНГ, що досліджується в статті, призначений для виконання пошукових і дослідницьких операцій під водою на невеликих глибинах. Управління ПРНГ здійснюється за допомогою двох пар гвинтів, розташованих уздовж поздовжньої і вертикальної осей. Така система управління дозволяє стабілізувати вертикальне переміщення і підтримувати заданий курс, але вона обмежена в можливості вирішення завдань позиціонування. Для виконання маневрів або руху по заданій траєкторії потрібні спеціалізовані алгоритми управління.

Узагальнена архітектура ПРНГ наведена на рис. 1.

Введемо такі обмеження та припущення:

- розташування гвинтів, світлодіодів й обладнання всередині корпусу забезпечує практично однакове вертикальне розташування центрів ваги і тиску ПРНГ;
- робот має хороший баланс і відсутність статичного крену і диференту;
- швидкості робота за поздовжньою і вертикальною осями є незначними;
- з огляду на невелику робочу глибину можна знехтувати збуреннями у вертикальній площині для ПРНГ.

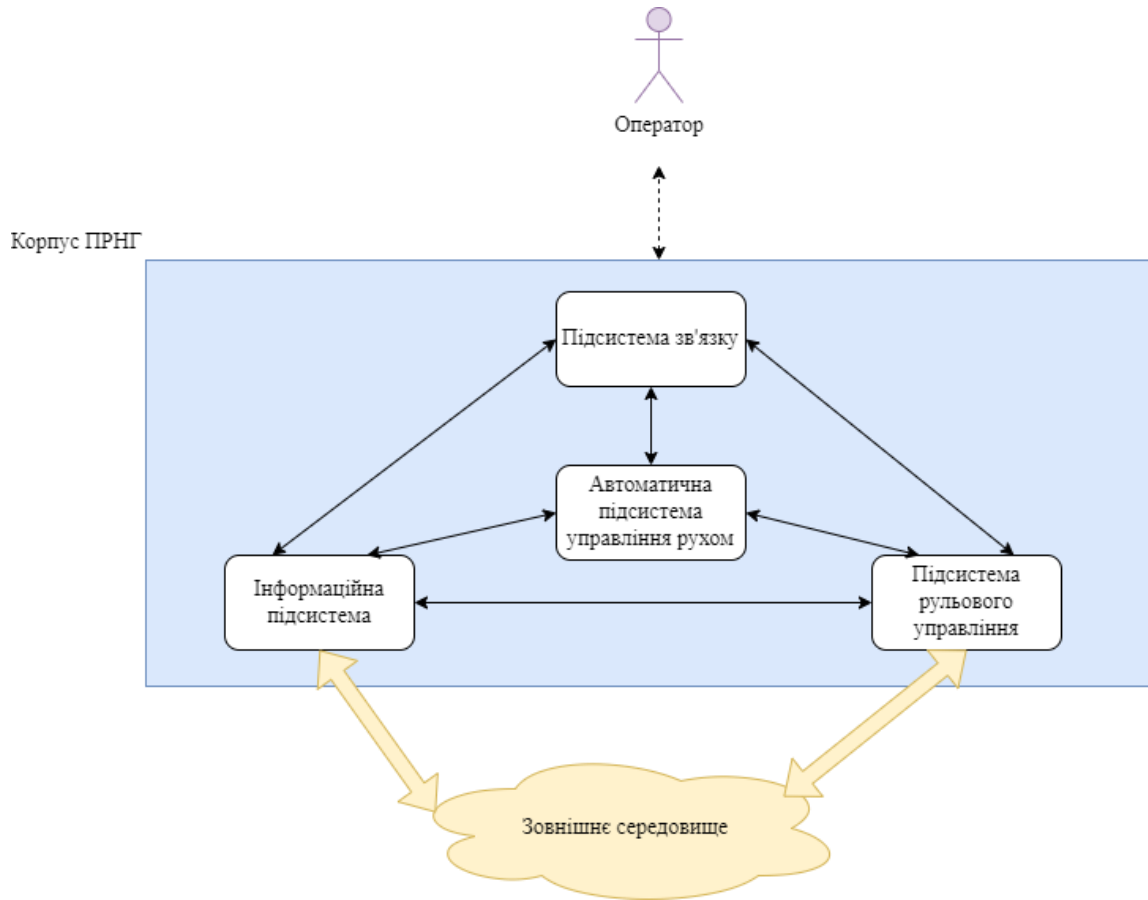


Рис. 1 – Узагальнена архітектура ПРНГ

Інформаційна система ПРНГ (див. рис. 1) має у своєму складі набір навігаційних датчиків і відеокамеру. Основним засобом отримання навігаційної інформації є модуль, що складається з мікромеханічних акселерометрів, гіроскопів і магнітометрів. Крім того, малогабаритний підводний робот має датчик тиску для вимірювання глибини занурення. У зв'язку з цим виникає завдання комплексної обробки вимірювань з метою отримання оцінок кутових переміщень і лінійних швидкостей для застосування алгоритмів керування. Основним недоліком інерціальної навігації є накопичення похибок вимірювань з плином часу. Основними джерелами цих похибок є похибки в гіроскопах і акселерометрах.

Основна концепція системи обробки інформації полягає в поділі складної системи на окремі канали або шляхи з паралельною оцінкою кутів Ейлера і кутових швидкостей. Отримані оцінки будуть використані для уточнення уявного прискорення ПРНГ, що дозволить отримати оцінки лінійних швидкостей.

Розрахункові кути, отримані з акселерометрів, і кутові швидкості, виміряні гіроскопами, використовуються для обробки даних за окремими траєкторіями.

Вхідні дані з акселерометрів характеризуються наявністю високочастотних перешкод. Гіроскопи, в свою чергу, мають деякі постійні зсуви через дрейф. Для спільної обробки цих даних розглядаються фільтри Калмана різної структури.

Пропонуємо використовувати спрощений фільтр другого порядку, заснований на принципі розподілу інформації. Для цього дані, отримані з акселерометра, коригуються за допомогою вимірювань, отриманих з гіроскопа, а також оцінюється зміщення гіроскопа. Математичні вирази для обчислення цього фільтра є такими:

$$\begin{bmatrix} \overline{P_{11}} & \overline{P_{12}} \\ \overline{P_{21}} & \overline{P_{22}} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} P_{11} + h(P_{22}h - P_{12} - P_{21} + Q_{\omega}^2 h) & P_{12} - P_{22}h \\ P_{21} - P_{22}h & P_{22} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{\overline{P_{11}}}{\overline{P_{11}} + R_\theta}; \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{\overline{P_{21}}}{\overline{P_{11}} + R_\theta}, \quad (3)$$

де  $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$  – елементи коваріаційної матриці оцінок;  
 $K_1, K_2$  – посилення фільтра Калмана;  
 $h$  – період відбору проб;  
 $Q_\omega, R_\theta$  – дисперсія вимірювання кутової швидкості та кута.

Для розрахунку кута крену і оцінок переміщення, реконструйованих за допомогою фільтра Калмана, використовують такий порядок розрахунку:

$$\overline{\hat{\theta}_{k+1}} = \overline{\hat{\theta}_k} + h(\omega_{x_k} - \widehat{\omega}_{xb_k}); \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_{k+1} = \overline{\hat{\theta}_{k+1}} + K_1(\theta_{k+1} - \overline{\hat{\theta}_{k+1}}); \quad (5)$$

$$\widehat{\omega}_{xb_{k+1}} = \widehat{\omega}_{xb_{k+1}} + K_2(\theta_{k+1} - \overline{\hat{\theta}_{k+1}}), \quad (6)$$

де  $\hat{\theta}$  – оцінка кута крену;  
 $\widehat{\omega}_{xb}$  – оцінка змішування гіроскопа;  
 $\omega_x$  – кутова швидкість, виміряна гіроскопом;  
 $\theta$  – кут крену, розрахований за даними акселерометра.

Коваріаційна матриця оцінок розраховується так:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \overline{P_{11}}(1 - K_1) & \overline{P_{12}}(1 - K_1) \\ \overline{P_{21}} - K_2\overline{P_{11}} & \overline{P_{22}} - K_2\overline{P_{21}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Запропонований фільтр показав ефективність зменшення кута крену і диференту. Однак у випадку з кутом рискання траєкторії похибки збільшувалися через наявність низькочастотного порушення, такого як витрата. В якості альтернативи розглядався розширений фільтр Калмана третього порядку, який містив додаткову оцінку збурень. Математичні вирази для обчислення цього фільтра є такими:

$$\begin{bmatrix} \overline{P_{11}} & \overline{P_{12}} & \overline{P_{13}} \\ \overline{P_{21}} & \overline{P_{22}} & \overline{P_{23}} \\ \overline{P_{31}} & \overline{P_{32}} & \overline{P_{33}} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} P_{11} + hP_{21} + h(P_{12} + hP_{22}) & P_{12} + hP_{22} + h(P_{13} + hP_{23}) & P_{13} + hP_{23} \\ P_{21} + hP_{31} + h(hP_{32} + P_{22}) & P_{22} + hP_{32} + h(hP_{33} + P_{23}) & P_{23} + hP_{33} \\ P_{31} + hP_{32} & P_{32} + hP_{33} & P_{33} + (Q_\omega h)^2 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \overline{P_{22}} + R_\omega & -\overline{P_{12}} \\ -\overline{P_{21}} & \overline{P_{11}} + R_\varphi \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \\ K_{31} & K_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P_{11}}Y_{22} + \overline{P_{12}}Y_{21} & \overline{P_{12}}Y_{11} + \overline{P_{11}}Y_{12} \\ \overline{P_{21}}Y_{22} + \overline{P_{22}}Y_{21} & \overline{P_{22}}Y_{11} + \overline{P_{21}}Y_{12} \\ \overline{P_{31}}Y_{22} + \overline{P_{32}}Y_{21} & \overline{P_{32}}Y_{11} + \overline{P_{31}}Y_{12} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для розрахунку оцінки кута рискання, реконструйованої за допомогою фільтра Кальмана, використовується такий розрахунковий підхід:

$$\hat{\varphi}_{k+1} = \hat{\varphi}_k + h\hat{\omega}_{y_k}; \quad (11)$$

$$\overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}} = \overline{\hat{\omega}_{y_k}} + h\hat{\mu}_k; \quad (12)$$

$$\overline{\hat{\mu}_{y_{k+1}}} = \overline{\hat{\mu}_{y_k}} + h\omega_k; \quad (13)$$

$$\hat{\varphi}_{k+1} = \overline{\hat{\varphi}_{k+1}} + K_{11}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{12}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}); \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_{y_{k+1}} = \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}} + K_{21}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{22}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}); \quad (15)$$

$$\hat{\mu}_{y_{k+1}} = \overline{\hat{\mu}_{y_{k+1}}} + K_{31}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{32}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}), \quad (16)$$

де  $\varphi$  – кут рискання;

$\mu$  – марковський процес, який оцінює зменшене низькочастотне обурення;

$K_{ij}$  – елементи вектора коефіцієнтів;

$R_\omega$  та  $R_\varphi$  – дисперсія шуму, вимірювання кута рискання і кутової швидкості.

Результатом формалізації відповідно до виразів (8)–(16) є коваріаційна матриця оцінок.

Результати випробувань показали, що використання розширеного фільтра Калмана призводить до більш точних оцінок кута повороту модуля ПРНГ. Введення додаткового коефіцієнта зворотного зв'язку дозволяє поліпшити швидкість реакції фільтра. Однак розширений фільтр вимагає більш ретельного налаштування. Для ефективної роботи в умовах хвильових збурень необхідно динамічно регулювати коваріацію збурення, що призводить до додаткового обчислювального навантаження на контролер ПРНГ. В таких умовах більш ефективні фільтри другого порядку. Також слід зазначити, що хвильове обурення впливає на рух ПРНГ тільки у приповерхневому шарі. Для досягнення точних оцінок лінійних швидкостей особлива увага приділяється високій частоті збору даних з гіроскопів і акселерометрів. З метою прискорення обробки даних були проведені оцінки лінійної швидкості для різних частот.

### Висновки

Таким чином, у даній статті запропоновано набір математичних залежностей, який формалізує процес фільтрації навігаційної інформації для ПРНГ за допомогою комплексної обробки даних. Фільтрація здійснюється за допомогою набору розподілених фільтрів Калмана різної структури, які були підібрані відповідно до характеристик оцінюваних даних. При цьому інерційний модуль з алгоритмами фільтрації Калмана може бути використаний для вимірювання кутових параметрів руху і вирішення завдань стабілізації крену, диференту і рискання. Завдяки відсутності високочастотних перешкод у вимірах датчика тиску і низьких швидкостей руху ПРНГ, дані датчика можуть бути використані для визначення вертикальної швидкості.

### Перелік використаних джерел:

1. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Dhillon B.S. Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. 2016. Vol. 5, № 4. Pp. 284-294. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijra.v5i4.pp284-294>.
2. Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller / A. Jebelli, M.C.E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. Kazemi. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2013. Vol. 7(1). Pp. 147-153.
3. Liu Z., Zhou X. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 649(1). Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/649/1/012017>.
4. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test / Z. Li, J. Tao, H. Sun, Y. Luo, L. Ding, Z. Deng. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(11). Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814017734500>.

5. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots / L. Christensen, J. de Gea Fernández, M. Hildebrandt, C.E. Siegfried Koch, B. Wehbe. *Current Robotics Reports*. 2022. Vol. 3. Pp. 165-175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00088-3>.
6. AI technology for underwater robots / F. Kirchner, S. Straube, D. Kühn, N. Hoyer. Springer, 2020. 193 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
7. Roehr T.M., Kirchner F. Spatio-temporal planning for a reconfigurable multi-robot system. *Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob)*. London, 2016. Pp. 135-146.
8. ROSPlan: Planning in the robot operating system / M. Cashmore, M. Fox, D. Long, D. Magazzeni, B. Ridder, A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtos, M. Carreras. *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*. 2015. Vol 25. Pp 333-341. DOI: <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13699>.
9. Braginsky B., Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: simulation and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2016. Vol. 41(4). Pp. 882-92. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2506204>.
10. Deep learning on underwater marine object detection: a survey / M. Moniruzzaman, S.M.S. Islam, M. Bennamoun, P. Lavery. *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*. 2017. Pp. 150-160. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4_13).

#### References:

1. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Dhillon B.S. Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2016, vol. 5, № 4, pp. 284-294. doi: <https://doi.org/10.11591/ijra.v5i4.pp284-294>.
2. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Abdul Rahim R.H.J., Kazemi H. Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2013, vol. 7(1), pp. 147-153.
3. Liu Z., Zhou X. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 649(1), pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/649/1/012017>.
4. Li Z., Tao J., Sun H., Luo Y., Ding L., Deng Z. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9(11), pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017734500>.
5. Christensen L., de Gea Fernández J., Hildebrandt M., Siegfried Koch C.E., Wehbe B. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. *Current Robotics Reports*, 2022, vol. 3, pp. 165-175. doi: <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00088-3>.
6. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. *AI technology for underwater robots*. Springer, 2020. 193 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
7. Roehr T.M., Kirchner F. Spatio-temporal planning for a reconfigurable multi-robot system. *Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob)*, London, 2016, pp. 135-146.
8. Cashmore M., Fox M., Long D., Magazzeni D., Ridder B., Carrera A., Palomeras N., Hurtos N., Carreras M. ROSPlan: Planning in the robot operating system. *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*, 2015, vol 25, pp 333-341. doi: <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13699>.
9. Braginsky B., Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: simulation and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, vol. 41(4), pp. 882-92. doi: <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2506204>.
10. Moniruzzaman M., Islam S.M.S., Bennamoun M., Lavery P. Deep learning on underwater marine object detection: a survey. *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*, 2017, pp. 150-160. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4_13).

Рецензент: О.М. Тимошук  
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 05.03.2023  
Стаття прийнята 13.05.2023