

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ПОШУКОМ НАДВОДНИХ ТА ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ГІБРИДНИМ РОБОТИЗОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ

Одним з важливих наукових завдань організації управління пошуком надводних та підводних об'єктів є забезпечення оперативності та безаварійного руху гібридного роботизованого комплексу в режимах переходу та виконання пошукової операції. Аналіз сучасних методів управління пошуком надводних та підводних об'єктів роботизованими апаратами в пошукових роботах, наукових та природоохоронних дослідженнях, моніторингу, інспекційних та воєнних підводних роботах показує необхідність застосування гібридних роботизованих комплексів. У рамках інтелектуалізації процесу планування маршруту актуальним є вирішення завдання синтезу оптимальної траєкторії руху для забезпечення виконання пошуку у всіх визначених районах проведення операції. У роботі вирішено завдання організації управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, а саме, побудова маршруту в області інтересу як оптимальної сплайн-траєкторії об'єкта, що рухається. Визначено можливість побудови навігаційної функції за рахунок ефективного використання кривизни сплайн-траєкторії як репродуктивного шаблону для побудови аксонометричної проекції. Для виконання поставленого завдання в роботі удосконалено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом шляхом формалізації процесів планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу та процесів обробки інформації, прогнозування навігаційної обстановки та вибору стратегії запобігання небезпечних ситуацій, за рахунок поєднання інтелектуальних та численних методів. Розроблений алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу дозволяє автоматизоване формування сплайн-траєкторій у режимі реального часу із синхронним поданням інформації про параметри маршруту руху в систему управління гібридним роботизованим комплексом. Даний підхід дозволяє автоматизувати процес пошукової операції та застосовувати його в концепції CoCoRo та e-Navigation.

Ключові слова: пошук на морі, надводний об'єкт, підводний об'єкт, гібридний роботизований комплекс, автономний ненаселений підводний апарат, безекіпажне пошукове судно.

O.V. Levchenko, M.V. Borina. Improving the method of controlling the search for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex. One of the important scientific tasks of organising the control of searching for surface and underwater objects is to ensure the efficiency and trouble-free movement of a hybrid robotic complex in the modes of transition and search operation. An analysis of modern methods of controlling the search for surface and underwater objects by robotic vehicles in search operations, scientific and environmental research, monitoring, inspection and military underwater operations shows the need to use hybrid robotic systems. As part of the intellectualisation of the route planning process, it is relevant to solve the problem of synthesising an optimal trajectory to ensure that the search is carried out in all designated areas of the operation. The paper solves the problem of organising the management of searching for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex, namely, building a route in the area of interest as an

¹ канд. екон. наук, доцент, здобувачка ступеня Phd, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-7659-347X, olevchenko76@gmail.com

² здобувачка ступеня Phd, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0009-0007-4859-8477, margo_borina@ukr.net

optimal spline trajectory of a moving object. The possibility of constructing a navigation function through the effective use of the curvature of the spline trajectory as a reproductive template for constructing an axonometric projection is determined. To accomplish this task, the paper improves the method of controlling the search for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex by formalising the processes of planning the route of the hybrid robotic complex and the processes of information processing, forecasting the navigation situation and choosing a strategy for preventing dangerous situations by combining intelligent and numerical methods. The developed algorithm for constructing a search route for a hybrid robotic complex allows automated formation of spline trajectories in real time with synchronous submission of information about the parameters of the route to the control system of the hybrid robotic complex. This approach makes it possible to automate the search operation process and apply it in the CoCoRo and e-Navigation concepts.

Key words: search at sea, surface object, underwater object, hybrid robotic complex, autonomous unmanned underwater vehicle, unmanned search vessel.

Постановка проблеми. Роботизовані комплекси стають важливим інструментом для морських операцій з пошуку надводних та/або підводних об'єктів [1]. Аналіз проведених пошукових операцій показує, що для досягнення високої продуктивності виконання надводних та підводних робіт необхідне групове застосування автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА), безкіпажних пошукових суден (БПС) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Тому основним напрямком підвищення продуктивності пошуку надводних та/або підводних об'єктів є створення гібридних роботизованих комплексів. У даному комплексі здійснюється групове застосування АНПА, БПС та БПЛА, які одночасно виконують спільну місію. Особливо ефективним таке застосування є для пошукових робіт, до яких висуваються жорсткі обмеження за часом виконання місії. Варіант схеми гібридного роботизованого комплексу зображено на рис. 1.

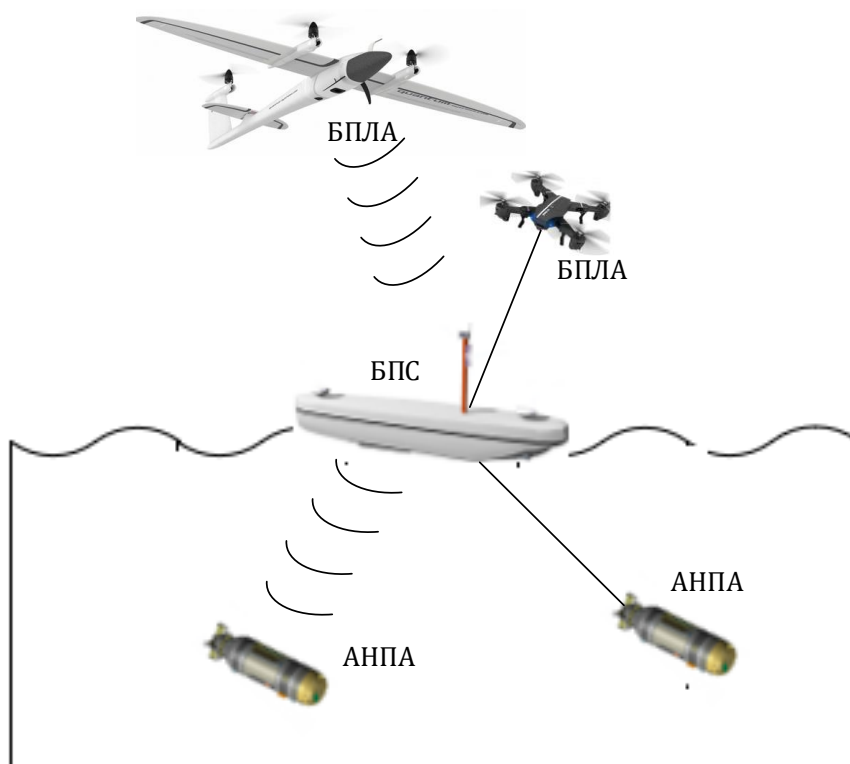


Рис. 1 – Варіант схеми гібридного роботизованого комплексу

До головних переваг гібридного роботизованого комплексу слід віднести:

- високу продуктивність надводних та підводних пошукових робіт, оскільки вони виконуються на великих за площею акваторіях із залученням роботизованих апаратів, причому їх кількість може змінюватись у залежності від вимог до загальної тривалості пошукової операції;
- низькі фінансові витрати на проведення морських операцій, оскільки для їх проведення застосовують дешеві АНПА, собівартість створення яких на 2-3 порядки нижча за собівартість традиційних АНПА малого класу.

До основних недоліків застосування гібридного роботизованого комплексу можна віднести:

- складність автоматизації узгодженої роботи апаратів, що входять до складу гібридного роботизованого комплексу при виконанні спільної пошукової операції;
- складність розробки системи автоматичного попередження аварійних ситуацій в умовах складної навігаційної обстановки;
- складність організації системи зв'язку між елементами комплексу та береговим центрами керування пошуковою операцією;
- ризики втрати частини апаратів гібридного роботизованого комплексу внаслідок впливу факторів навігаційної обстановки, збоїв програмного забезпечення системи автоматизованого управління чи технічних відмов окремих апаратів.

Складність управління гібридним роботизованим комплексом полягає в оперативному плануванні безпечного маршруту руху у процесі пошуку надводних та/або підводних об'єктів. Це накладає необхідність врахування множини параметрів при побудові маршруту зі зміною районів пошуку, із забезпеченням оперативності та безпеки пошукової операції. Відомі методи планування маршруту або мають високу обчислювальну складність, або не дозволяють знайти траєкторію, оптимальну за довжиною шляху. Це не дозволяє використовувати їх в системах, де необхідно планування маршруту в режимі реального часу з умовою мінімізації переміщення.

Для формальної постановки задачі планування маршруту гібридного роботизованого комплексу в пошуковій операції надводних та підводних об'єктів в роботі введено позначення, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Позначення для формальної постановки задачі планування

Позначення	Значення
$\{x_0, x_n, x_f\} \in X$ $\{y_0, y_n, y_f\} \in Y$	Координати початкової, проміжних та кінцевої точок, які мають належати множині всіх точок маршруту пошуку
$x_i \in X, y_i \in Y$	Координати маршруту пошуку в момент часу $t_i \in T^{route}$
$U = f(x, y)$	Навігаційна функція для побудови маршруту руху гібридного роботизованого комплексу
$x^{obs} \in Z_{int}, y^{obs} \in Z_{int}, D_{obs}^{safe}$	Координати навігаційних перешкод та дистанція безпечного розходження, що знаходяться в області інтересу в операції пошуку
Z_{int}	Область інтересу в операції пошуку
$R_i^Z \in Z_{int}$	Район проведення пошуку
p^{route}	Курсовий параметр проходу маршруту повз перешкоду

Під інтелектуальним плануванням маршруту розуміється синтез переведення роботизованого апарату з деякого вихідного стану до функціонально-цільового шляхом фіксування його координат у кінцевому навігаційному просторі. Планом маршруту гібридного роботизованого комплексу є така навігаційна функція $U = f(x, y)$, яка дозволяє здійснити рух з початкової точки $x_0 \in X$ в кінцеву точку $x_f \in X$ та проходить через всі визначені проміжні точки $x_n \in X$, причому

точки $x^{obs} \notin X$, $y^{obs} \notin Y$ та $p^{route} \geq D_{obs}^{safe}$. Для синтезу маршруту гібридного роботизованого комплексу необхідно знайти таку:

$$U = f(x, y), \quad (1)$$

за умов

$$\begin{cases} x_0, x_f, x_n \in X \\ y_0, y_n, y_f \in Y \\ x^{obs} \notin X, y^{obs} \notin Y \\ p^{route} \geq D_{obs}^{safe} \end{cases}, \quad (2)$$

при якій

$$\begin{cases} T^{route} \rightarrow \min \\ P_{safe}^{route} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (3)$$

де T^{route} – загальний час проходження маршруту; P_{safe}^{route} – ймовірність безаварійного проходження маршруту.

Для розв'язання поставленої задачі необхідна розробка низьковитратного за обчислювальними ресурсами алгоритму, який дозволить планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню науковій проблематики автоматичного групового керування роботизованими комплексами та застосування їх для пошуку підводних та надводних об'єктів присвячено значну кількість досліджень.

Так, робота [2] присвячена вирішенню завдань організації сумісних узгоджених дій групи АНПА. У роботі запропоновано узагальнений підхід до виконання спільних дій різними роботизованими апаратами. У роботі [3] викладені результати, що були отримані під час виконання європейського проекту «GREX», який спільно виконувався університетами та робототехнічними фірмами Євросоюзу, які є важливим внеском в теорію та практику морської робототехніки. Методам автоматизації групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу присвячена робота [4], в якій автор на основі реалізації принципів адгезії, когезії та вирівнювання розробив систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи шляхом введення нечітких регуляторів, що виключає аварійне зіткнення з сусідніми АНПА групи та розпад групи через втрату сенсорного контакту між ними. Аналіз можливості висвітлення надводної обстановки в Азовському морі за допомогою використання безкіпажних морських роботизованих систем (комплексів) наведено в роботі [5]. Властивості морських ссавців, які знайшли та можуть знайти застосування в майбутньому, під час створення надводних і підводних роботизованих апаратів і морських озброєнь, визначені та проаналізовані у роботі [6]. У роботі [7] наведено розроблену узагальнену структуру систему автоматичного керування самохідним прив'язним підводним апаратом, яка дасть змогу зменшити навантаження на оператора та підвищити ефективність технології моніторингу. Проблеми створення систем керування морськими роботизованими комплексами вирішуються у роботах [8, 9]. Завдання локалізації, навігації та комунікації при сумісних діях морських роботизованих комплексів розглянуті у роботах [10-11]. Питання формування та утримання групи роботизованих апаратів у процесі сумісного виконання завдання розглянуто у роботі [12].

Проте, у наведених роботах не в повній мірі розкриті питання автоматизації управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом.

Мета дослідження полягає в удосконаленні методу управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом в умовах близькості навігаційних небезпек для підвищення оперативності та безпеки при виконанні ними спільної пошукової операції.

Виклад основного матеріалу. Процес вирішення завдань пошуку надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, складається з таких етапів:

- Етап 1. Отримання та аналіз умов завдання на пошук надводного або підводного об'єкта.
- Етап 2. Визначення областей пошуку.
- Етап 3. Розподіл групи АПА на підгрупи та постановка часткових завдань.

Етап 4. Планування узгоджених маршрутів руху до областей інтересу кожній підгрупі АПА.

Етап 5. Реалізація управлінь узгодженими діями підгруп АПА до областей пошуку з обходом перешкод та запобіганням можливим зіткненням зі стаціонарними та мобільними об'єктами.

Етап 6. Виконання завдання в області пошуку.

Етап 7. Вихід та рух в район збору з обходом перешкод та запобіганням зіткненням.

Згідно до етапів процесу вирішення завдань пошуку надводних та підводних об'єктів було розроблено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом (рис. 2).

Завдання на пошук, що передається групі засобів пошуку гібридного роботизованого комплексу, подається у формалізованому вигляді, що дозволяє в бортових системах планувати та реалізувати подальші дії групи, підгруп та окремих АПА та БПС. Було сформовано склад опису типових цільових завдань пошуку:

- вид необхідного пошуку: на площі, лінії, вторинний пошук (пошук за викликом), моніторинг;
- опис об'єктів пошуку;
- опис області пошуку;
- вимоги щодо оцінки ефективності пошуку.

Відповідно до опису цільової задачі формується область інтересу пошукової операції та райони пошуку надводних та/або підводних об'єктів.

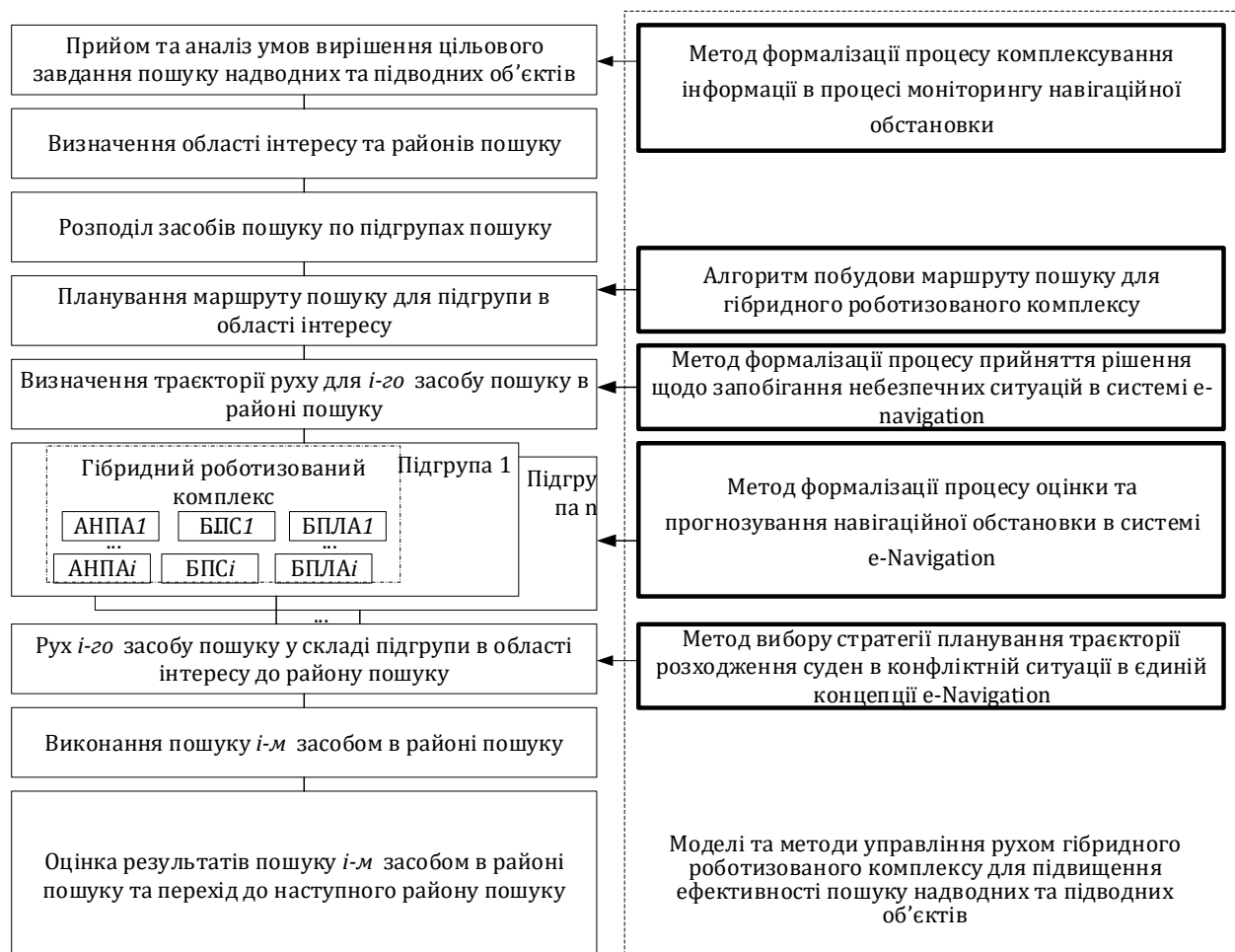


Рис. 2 – Удосконалений метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом (джерело: розроблено автором)

Основним етапом в процесі управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом є планування маршруту пошуку для підгрупи в області інтересу, оскільки від нього залежить оперативність, ефективність та безпека пошукової операції. Для планування маршруту пошуку для підгрупи в області інтересу запропоновано алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу. Схема алгоритму наведена на рис. 3.

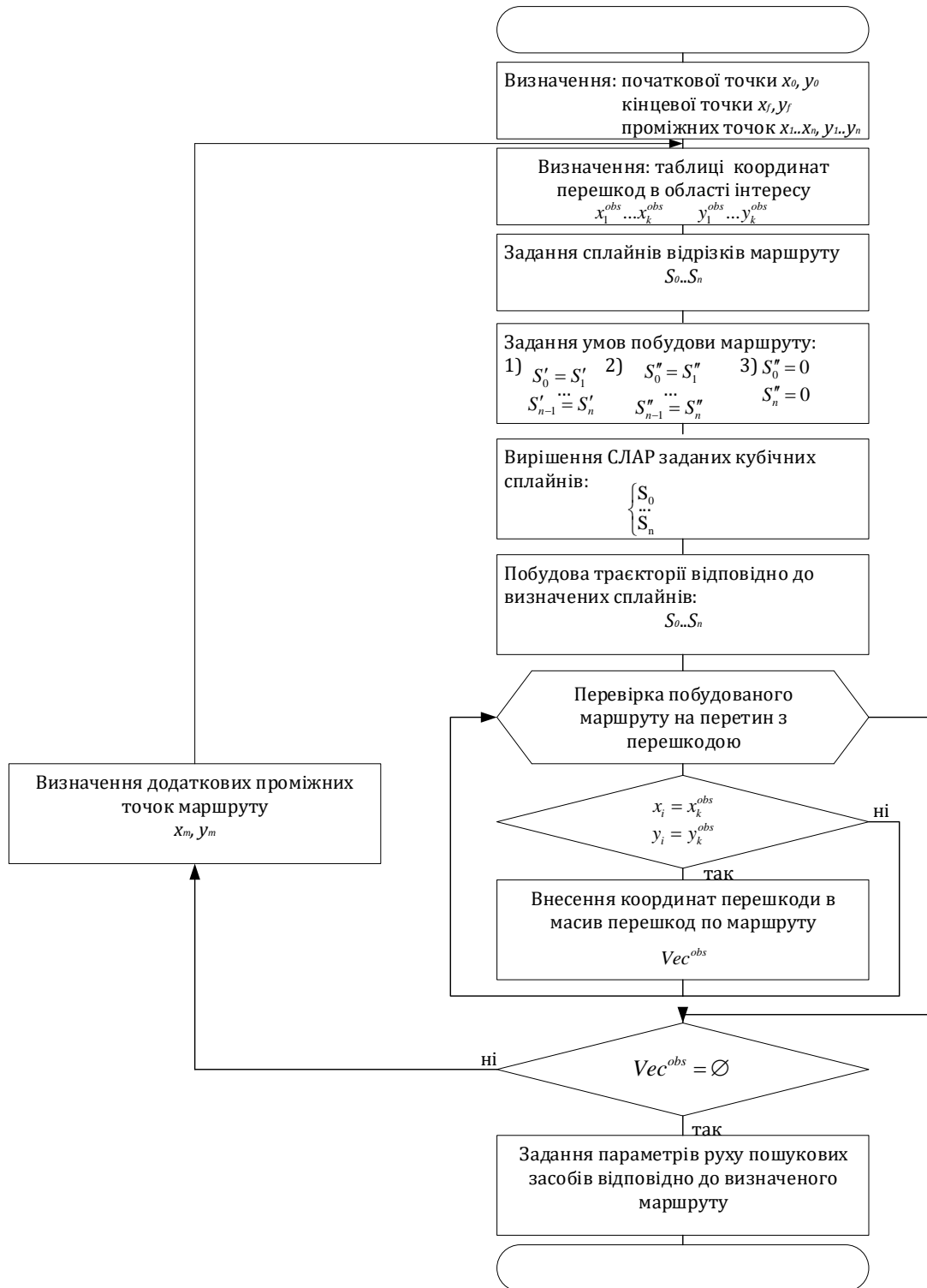


Рис. 3 – Схема алгоритму побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу (джерело: розроблено автором)

Для формування маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу застосовано підхід на основі інтерполяції кубічними сплайнами [13]. На першому етапі визначаються координати початкової точки початку та кінця маршруту. Координати проміжних точок визначаються відповідно до районів пошуку (РП). А саме вибираються точки входу та виходу з району пошуку. Черговість обходу районів пошуку визначається згідно ймовірності знаходження та важливості об'єктів пошуку в цих районах (рис. 4).

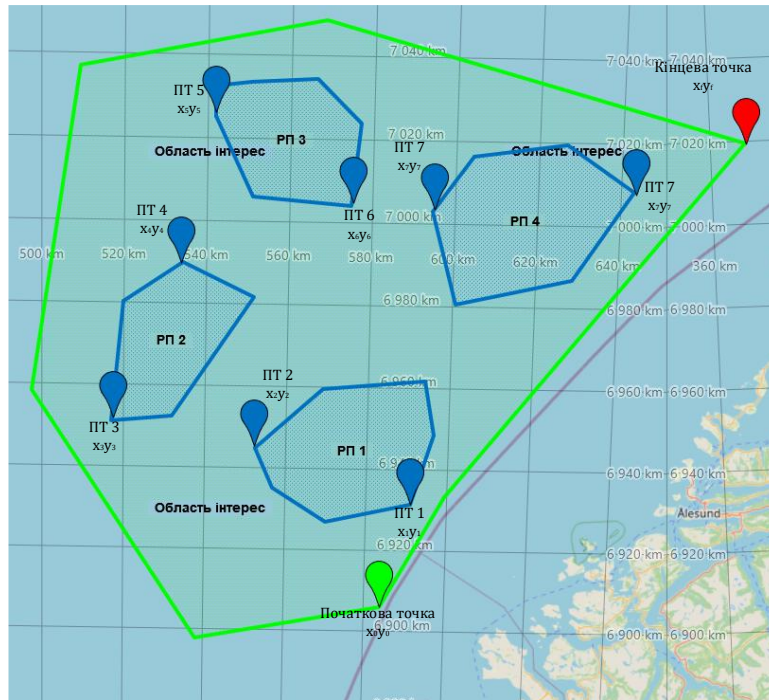


Рис. 4 – Схема області інтересу та районів пошуку та визначення початкової, кінцевої та проміжних точок маршруту (джерело: розроблено автором)

На наступному етапі виконується задання сплайнів відрізків маршруту відповідно до визначених початкової, кінцевої та проміжних точок за виразом:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= a_0 + b_0(x - x_0) + c_0(x - x_0)^2 + d_0(x - x_0)^3 \\
 S_1 &= a_1 + b_1(x - x_1) + c_1(x - x_1)^2 + d_1(x - x_1)^3 \\
 &\dots \\
 S_n &= a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n)^2 + d_n(x - x_n)^3
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

де S_0, S_1, \dots, S_n – сплайни відрізків маршруту відповідно до точок маршруту;

x_0, x_1, \dots, x_n – координати початкової точки відрізка;

x – координата кінцевої точки відрізка;

a, b, c, d – коефіцієнти сплайна.

Для формування маршруту необхідно задати граничні умови, що формують кривизну та початок і кінець маршруту. Умови визначаються виразами:

1) Для визначення кута входу в точку маршруту:

$$\begin{aligned}
 S'_0 &= S'_1 \\
 S'_{n-1} &= S'_n
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

2) Для визначення кривизни проходу в точки маршруту:

$$\begin{aligned} S_0'' &= S_1'' \\ S_{n-1}'' &= S_n'' \end{aligned} \quad (6)$$

3) Для визначення умови початку та кінця маршруту:

$$\begin{aligned} S_0'' &= 0 \\ S_n'' &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

В результаті формується система лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} S_0 = a_0 + b_0(x - x_0) + c_0(x - x_0) + d_0(x - x_0) \\ S_1 = a_1 + b_1(x - x_1) + c_1(x - x_1) + d_0(x - x_1) \\ \dots \\ S_n = a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n) + d_n(x - x_n) \\ S_0' = b_0 + 2c_0(x - x_0) + 3d_0(x - x_0)^2 \\ \dots \\ S_{n-1}' = b_{n-1} + 2c_{n-1}(x - x_{n-1}) + 3d_{n-1}(x - x_{n-1})^2 \\ S_0'' = 2c_0 + 6d_0(x - x_0) \\ \dots \\ S_{n-1}'' = 2c_{n-1} + 6d_{n-1}(x - x_{n-1}) \\ S_0'' = 0 \\ S_n'' = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Вирішення системи лінійних рівнянь (8) дозволяє визначити коефіцієнти сплайнів та підставити їх у навігаційну функцію:

$$U = f(x, y), \quad (9)$$

для кожного відрізка маршруту. Інтерполяція навігаційної функції U виконується множенням значень x , де $x \in [x_0, x_f]$ на розрахункові сплайнові скалярні коефіцієнти a, b, c, d при фінальному підсумовуванні отриманих алгебраїчних елементів в кожному відрізку, що заданий відповідним сплайном.

$$U = \begin{cases} y_0 = a_0 + b_0(x) + c_0(x)^2 + d_0(x)^3, \text{ де } x \in [x_0, x_1] \\ y_1 = a_1 + b_1(x) + c_1(x)^2 + d_0(x)^3, \text{ де } x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ y_n = a_n + b_n(x) + c_n(x)^2 + d_n(x)^3, \text{ де } x \in [x_n, x_f] \end{cases} \quad (10)$$

Геометрична інтерпретація синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу на основі підходу інтерполяції кубічними сплайнами показана на рис. 5.

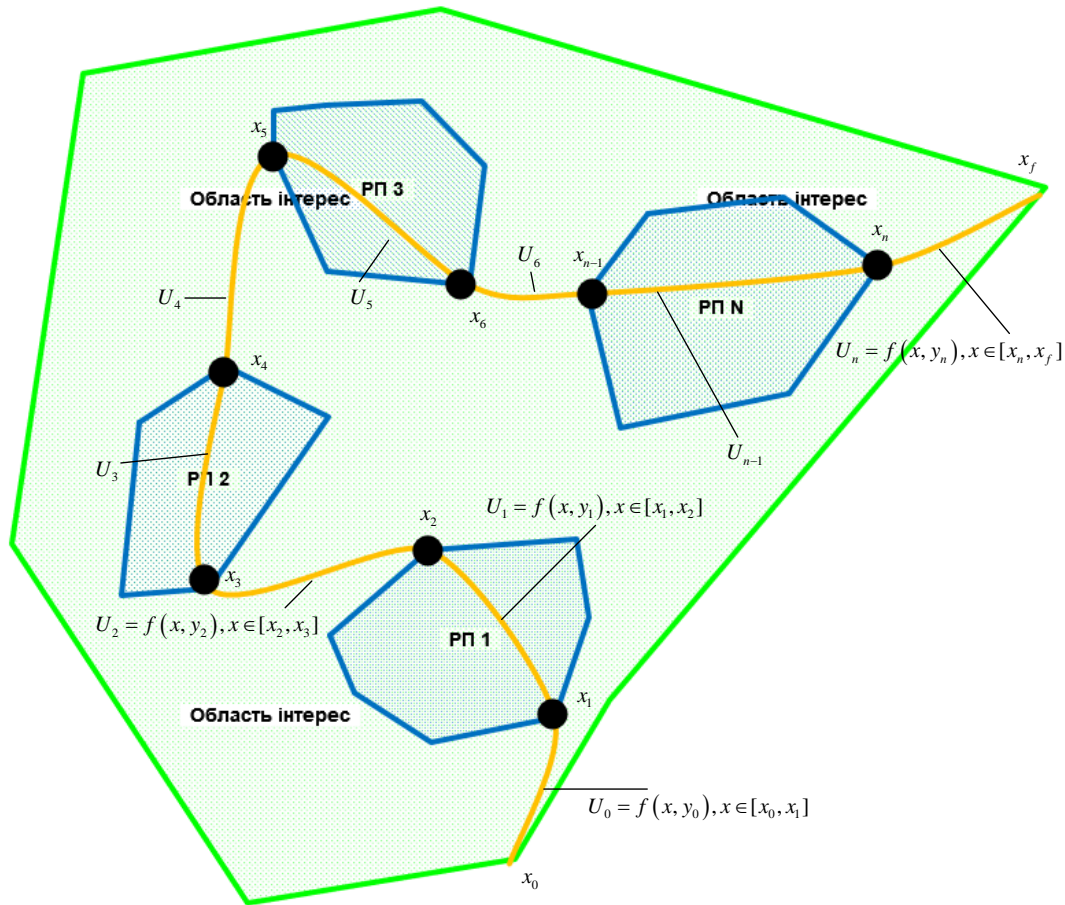


Рис. 5 – Геометрична інтерпретація синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу (джерело: розроблено автором)

Після синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу виконується перевірка на безпечність маршруту відносно ситуацій небезпечного зближення зіткнення з навігаційними перешкодами. Маршрут перетинає навігаційну перешкоду, якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} x^{obs} = x_i, y^{obs} = y_i \\ \text{and / or} \\ p^{route} \leq D_{safe}^{obs} \end{cases} \quad (11)$$

де x^{obs}, y^{obs} – координати навігаційної перешкоди;

p^{route} – курсовий параметр проходу маршруту повз навігаційну перешкоду;

D_{obs}^{safe} – безпечна дистанція розходження з навігаційною перешкоду.

При виконанні умови навігаційна перешкода заноситься у масив перешкод Vec^{obs} у формі:

$$Vec^{obs} = \left\{ \left\{ x_1^{obs}, y_1^{obs}, D_1^{obs}, par_1^{obs} \right\}, \left\{ x_2^{obs}, y_2^{obs}, D_2^{obs}, par_2^{obs} \right\}, \dots, \left\{ x_k^{obs}, y_k^{obs}, D_k^{obs}, par_k^{obs} \right\} \right\}, \quad (12)$$

де par^{obs} – параметр, що вказує на напрямок обходу навігаційної перешкоди (ліворуч або праворуч).

Якщо $Vec^{obs} = \emptyset$, то результат роботи алгоритму передається групі засобів пошуку гібридного роботизованого комплексу. У випадку, коли $Vec^{obs} \neq \emptyset$, тоді визначаються нові проміжні точки маршруту, на основі яких будується траєкторія обходу навігаційної перешкоди за виразом:

$$\begin{cases} x_{i+1}^{route} = x^{obs} \pm \Delta x \\ y_{i+1}^{route} = y^{obs} \pm \Delta y \end{cases}, \quad (13)$$

при

$$\begin{cases} \Delta x = D_{safe}^{obs} \cdot \cos \alpha \\ \Delta y = D_{safe}^{obs} \cdot \sin \alpha \end{cases}. \quad (14)$$

де α – кут між p^{route} та напрямком осі координат.

Знак " \pm " визначається відповідно до значення par^{obs} та напрямком руху гібридного роботизованого комплексу. В результаті визначаються нові проміжні точки маршруту і алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу повторюється. Геометричну інтерпретацію синтезу нового маршруту з урахуванням перешкод наведено на рис. 6.

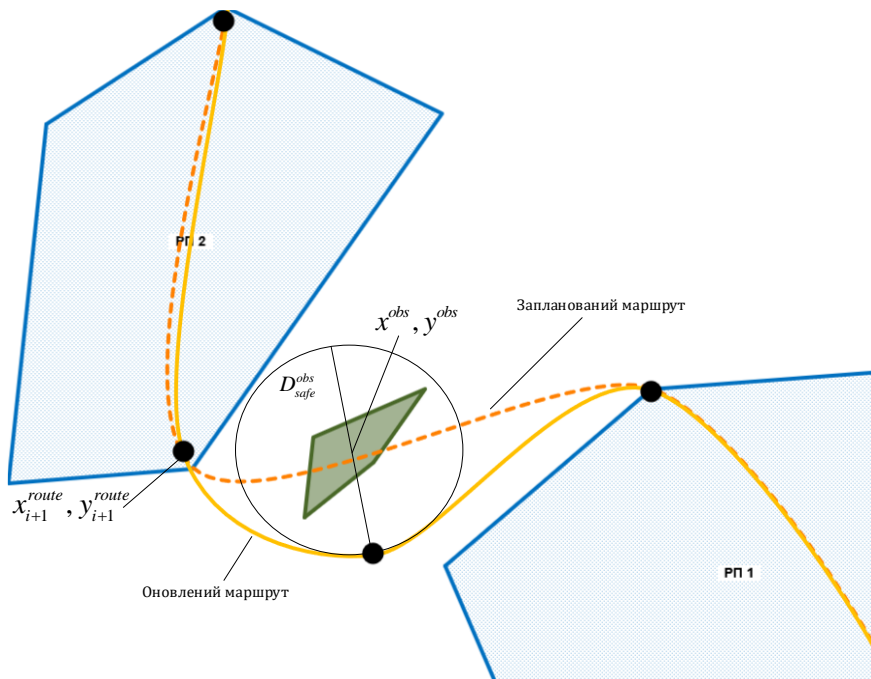


Рис. 6 – Геометрична інтерпретація синтезу нового маршруту з урахуванням перешкод (джерело: розроблено автором)

Вироблення маршруту руху гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами може бути застосована як інтелектуальна підтримка прийняття рішення в пошуковій операції у рамках стратегічної технології e-Navigation. Алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами може бути застосований у спеціальному програмному забезпеченні планування маршруту, що розробляється на основі технології великих даних.

Висновки

Аналіз процесу проведення пошуку надводних та підводних об'єктів показує, що одним з перспективних напрямків підвищення ефективності та безпеки є групове застосування роботизованих апаратів різних типів (БПЛА, БПС, АНПА). На даний момент швидко розвивається

напряму робототехніки – «Collective Cognitive Robots, CoCoRo» (колективні когнітивні апарати-роботи), що потребує автоматизації на трьох основних рівнях:

- базовому (автоматизація окремого роботизованого апарату);
- локальному рівні (групове управління роботизованих апаратів);
- глобальному рівні (автоматизація пошукової операції).

Для реалізації принципів CoCoRo на глобальному рівні необхідним є застосування концепції e-Navigation для автоматизації процесу збору, обробки та видачі інформації в процесі пошукової операції, для підвищення оперативності та безпеки проведення робіт.

У статті удосконалено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, в якому формалізація етапів планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу та процесів обробки інформації, прогнозування навігаційної обстановки та вибору стратегії запобігання небезпечних ситуації дозволяє автоматизувати процес пошукової операції на всіх трьох рівнях CoCoRo. Розроблений алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами дозволяє прецизійно оцінювати оптимізацію маршруту руху гібридного роботизованого комплексу у складній навігаційній обстановці за рахунок ефективного контролю відстані до навігаційних небезпек та точок маршруту.

Перелік використаних джерел:

1. Allard Y., Shahbazian E. Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information. Defense Research & Development Canada, Atlantic Research Centre, OODA Technologies Inc. 2014. 78 p.
2. Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю., Гребеняк А.В. Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології.* 2009. № 650. С. 167-173.
3. Kalwa J. Final Results of the European Project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. *IFAC Proceedings Volumes.* 2010. Vol. 43, iss. 16. Pp. 181-186. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00033>.
4. Алоба Л.Т. Автоматизація групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03. Миколаїв, 2021. 203 с.
5. Фролов С.М., Сидоренко О.В. Безекіпажні морські роботизовані системи (комплекси) для висвітлення обстановки в Азовському морі. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України ім. Івана Черняховського.* 2019. № 3(67). С. 110-114. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-3-67/110-114>.
6. Марінічева К.В., Савінок О.М., Кобзар Т.А. Аналіз досвіду використання якостей морських ссавців під час створення роботизованих морських апаратів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.* 2020. № 4. С. 12-21. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).2](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).2).
7. Блінцов О.В., Сірівчук А.С. Концепція роботизованого моніторингу підводного середовища на основі застосування прив'язних підводних апаратів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014. № 3(72). С. 18-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30871>.
8. Левченко О.В. Метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна. *Системи управління, навігації та зв'язку.* 2022. № 4(70). С. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.004>.
9. Elangovan M., Balaji T. Basic Design for the development of Autonomous Underwater Vehicle. *International Research Journal on Advanced Science Hub.* 2020. № 2(11). С. 12-17.
10. Milošević Z. Guidance System For Autonomous Underwater Vehicles in Confined Environments: Ph.D. thesis. ... doctor of philosophy: automation and robotics. Madrid, 2020. 174 p.
11. Elangovan M. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied sciences.* 2020. № 10(1256). Pp. 3-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
12. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* 2020. № 10(1256). Pp. 3-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
13. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles: a review / Y. Tao, T. Yan, Z. Xu,

S. Yang, A. Gadsden. *Intell Robot.* 2023. № 3(1). Pp. 23-45. DOI: <https://doi.org/10.20517/ir.2023.01>.

14. Сплайн-функції та їх застосування / Б.П. Довгий, А.В. Ловейкін, Є.С. Вакал, Ю.Є. Вакал. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 117 с.

References:

- Allard Y., Shahbazian E. *Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information*. Defense Research & Development Canada, Atlantic Research Centre, OODA Technologies Inc. Publ., 2014. 78 p.
- Golembo V.A., Bochkar'ov O.Iu., Grebeniak A.V. The problem of organizing coordinated collective actions of autonomous mobile underwater vehicles. *The Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Computer sciences and information technologies*, 2009, № 650, pp. 167-173. (Ukr.)
- Kalwa J. Final Results of the European Project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, vol. 43, iss. 16, pp. 181-186. doi: <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00033>.
- Alopa L.T. *Automation of group management of autonomous uninhabited search-type underwater vehicles*. Cand. tech. sci. diss. Mykolaiv, 2021. 203 p. (Ukr.)
- Frolov S., Sydorenko O. Unmanned marine robotic systems for illuminating the situation in the Azov Sea. *Collection of Scientific Works of the Center for Military and Strategic Research of the National Defense University of Ukraine*, 2019, № 3(67), pp. 110-114. doi: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-3-67/110-114>. (Ukr.)
- Marinicheva K.V., Savinok O.N., Kobzar T.A. Analysis of the experience of using the qualities of marine mammals in the creation of robotic marine vehicles. *Collection of Scientific Publications NUS*, 2020, № 4, pp. 12-21. doi: [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).2](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).2). (Ukr.)
- Blintsov O.V., Sirivchuk A.S. The formation of the concept of robotic monitoring of an underwater environment based on the use of remotely operated vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, № 3(72), pp. 18-21. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30871>. (Ukr.)
- Levchenko O.V. Method of assessing and forecasting the navigation situation during ship motion. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2022, № 4(70), pp. 4-9. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.004>. (Ukr.)
- Elangovan M., Balaji T. Basic Design for the development of Autonomous Underwater Vehicle. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2020, № 2(11), pp. 12-17.
- Milošević Z. *Guidance System For Autonomous Underwater Vehicles in Confined Environments*. Ph.D. thesis. Madrid, 2020. 174 p.
- Elangovan M. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied sciences*, 2020, № 10(1256), pp. 3-37. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
- Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, № 10(1256), pp. 3-37. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
- Tao Y., Yan T., Xu Z., Yang S., Gadsden A. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles: a review. *Intell Robot*, 2023, № 3(1), pp. 23-45. doi: <https://doi.org/10.20517/ir.2023.01>.
- Dovgii B.P., Loveikin A.V., Vakal E.S., Vakal Iu.E. *Spline functions and their application*. Kyiv, Kyivs'kii universitet Publ., 2016. 117 p. (Ukr.)

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

Стаття надійшла 18.01.2023
Стаття прийнята 12.03.2023