

УДК 629.58
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).4](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).4)

EXTERNAL DESIGN TASKS OF AN UNDERWATER ROBOT INTENDED FOR THE PROTECTION OF MARINE CRITICAL INFRASTRUCTURE IN SHALLOW-WATER MARITIME AREAS

ЗАВДАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПІДВОДНОГО РОБОТА ДЛЯ ОХОРОНИ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА МІЛКОВОДНИХ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЯХ

Volodymyr S. Blintsov
bvs050803@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3912-2174
Andrii A. Tarchuk
tarchuk1996@gmail.com
ORCID: 0009-0009-6904-2544

В. С. Блінцов,
док. техн. наук, професор
А. А. Тарчук,
аспірант

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

Abstract. The article addresses the formulation of external design tasks for an underwater robot intended to protect objects of maritime critical infrastructure in shallow-water sea areas. The study belongs to the field of marine robotics systems for defense applications. The aim of the research is to define the external design tasks of an autonomous underwater vehicle with a towed radio buoy (AUV-RB) as a scientific and methodological basis for the development of such marine robotic systems intended for the protection and surveillance of shallow-water maritime infrastructure in Ukraine.

The study substantiates the application of a system approach to the external design of the AUV-RB, which enables a comprehensive analysis of interrelated technical, energetic, informational, and operational factors determining the efficiency of the development and functioning of next-generation underwater vehicles. Based on the analysis of the functional purpose and operational environment of the AUV-RB in shallow waters, four interrelated subsets of external design tasks have been formulated.

The first subset includes structural, layout, and hydrodynamic tasks, aimed at optimizing the geometric configuration, arrangement of functional modules, and hydrodynamic performance of the vehicle. The second subset involves energy-related tasks, focused on developing methods for assessing and improving the propulsion energy efficiency during autonomous operation without constant radio communication with the coastal control center. The third subset covers information, communication, and control tasks, which include evaluating design solutions ensuring navigation accuracy, communication reliability through the towed radio buoy, and synchronization of navigation systems (INS, USBL, DVL). The fourth subset consists of operational efficiency tasks, defining the mission objectives, range of operational activities, and principles of interaction with other marine platforms and coastal command systems.

The formulated design tasks create a scientific and methodological framework for the external design of AUV-RB systems, which can be used to assess their technical feasibility and to define requirements for subsequent stages of internal design. The results provide a methodological basis for developing the construction of the towed radio buoy, its onboard equipment, deployment and recovery mechanisms, as well as for the creation of integrated automatic control and communication systems.

Thus, the study establishes a scientifically grounded foundation for developing a new class of marine robotic systems capable of effective operation in shallow-water environments, ensuring improved situational awareness, communication reliability, and resilience to environmental disturbances as part of integrated maritime critical infrastructure protection systems.

Key words: autonomous underwater vehicle; towed radio buoy; external design; marine robotics; maritime critical infrastructure protection; system approach; communication and control systems.

Анотація. У статті розглянуто питання формулювання завдань зовнішнього проектування підводного робота для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Метою дослідження є формулювання завдань зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата

з буксирним радіобуєм (АНПА-РБ) як науково-методологічної основи для розроблення такого засобу морської робототехніки, призначеного для охорони та захисту мілководних об'єктів морської критичної інфраструктури України.

Обґрунтовано доцільність застосування системного підходу до зовнішнього проектування АНПА-РБ, який забезпечує комплексний розгляд взаємопов'язаних технічних, енергетичних, інформаційно-комунікаційних та експлуатаційних факторів, що визначають ефективність створення і функціонування підводних апаратів нового виду. На основі аналізу функціонального призначення АНПА-РБ та умов його експлуатації у мілководних акваторіях сформульовано чотири взаємопов'язані підмножини завдань зовнішнього проектування.

Перша підмножина включає конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, спрямовані на визначення оптимальних геометричних форм, взаємного розташування модулів та характеристик руху апарата в умовах нестабільного гідродинамічного середовища. Друга підмножина охоплює завдання енергетики, пов'язані з розробленням методики оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу під час автономного руху апарата без зв'язку з береговим центром керування. Третя підмножина складається з інформаційно-комунікаційних та керуючих завдань, які включають оцінку проектних рішень щодо забезпечення точності навігаційного позиціонування, надійності зв'язку через буксирований радіобуй, ефективності роботи систем автоматичного керування та синхронізації навігаційних систем (INS, USBL, DVL). Четверта підмножина охоплює завдання ефективного застосування, що визначають функціональне призначення апарата, перелік типових робіт, а також принципи взаємодії з іншими морськими платформами та береговими центрами управління.

Сформульовані підмножини завдань утворюють науково-методологічну основу зовнішнього проектування АНПА-РБ, яка може бути використана для оцінки технічної та функціональної перспективності створення таких апаратів, а також для розроблення технічних вимог до подальших етапів внутрішнього проектування. Отримані результати створюють методологічне підґрунтя для розроблення конструкції буксирного радіобуя, складу його обладнання, механізму випускання та повернення до апарата, а також для створення комплексних систем автоматичного керування і зв'язку.

Таким чином, проведене дослідження формує науково обґрунтовану базу для створення нового класу підводних робототехнічних комплексів, здатних ефективно функціонувати у мілководних морських акваторіях, забезпечуючи високий рівень ситуаційної обізнаності, надійності зв'язку та стійкості до зовнішніх впливів у складі інтегрованих систем охорони й захисту морської критичної інфраструктури України.

Ключові слова: автономний ненаселений підводний апарат; буксирований радіобуй; зовнішнє проектування; морська робототехніка; охорона морської критичної інфраструктури; системний підхід; інформаційно-комунікаційна взаємодія.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У сучасних умовах посилення гібридних загроз, терористичних актів та зростання техногенного навантаження на морське середовище, особливої ваги набуває питання безпеки об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ), розташованих у мілководних районах (до 100 метрів глибини). До таких об'єктів належать порти, термінали, підводні комунікації, нафтогазові установки, об'єкти військово-морської інфраструктури тощо.

Мілководні зони є особливо вразливими через обмежені можливості традиційних систем спостереження та реагування, а також через високу доступність для потенційних диверсійних чи терористичних дій. Крім того, кліматичні зміни та активізація природних процесів (зсуви, ерозія, біологічне обростання тощо) створюють додаткові ризики для стабільної роботи об'єктів МКІ.

У цьому контексті виникає потреба у впровадженні новітніх технічних рішень, зокрема – засобів підводної робототехніки (ЗПР), здатних забезпечити ефективний моніторинг, охорону та реагування на загрози безпеці об'єктів МКІ в режимі реального часу. Розвиток спеціальних засобів морської робототехніки

дозволить суттєво підвищити рівень безпеки, оперативності та адаптивності систем захисту морської інфраструктури.

Такі засоби мають забезпечувати безперервний моніторинг підводного простору, своєчасне виявлення потенційно небезпечних об'єктів, їх ідентифікацію, картографування та транспортування до місць безпечного зберігання або знищення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження у галузі морської робототехніки свідчать про значний прогрес у використанні безекіпажних надводних суден (БНС) та автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) для охорони і захисту об'єктів МКІ.

Дамо короткий огляд застосування ЗПР у провідних морських країнах світу.

США відомі своїми програмами розвитку безекіпажних морських суден та автономних апаратів для захисту інфраструктури. Одним із яскравих прикладів є програма U.S. Navy Unmanned Maritime Autonomy Architecture (UMAA) [1], яка передбачає розвиток автономних морських платформ для

моніторингу, патрулювання та розмінування морських акваторій.

Велика Британія інвестує в розвиток технологій для захисту морської інфраструктури за допомогою безпілотних катерів і підводних апаратів [2–4]. Програми автоматизованого виявлення і знищення морських мін активно використовують новітні технології автономії, зокрема на базі надводних і підводних апаратів-роботів.

Сфера морської робототехніки у Китаї також активно розвивається, і в країні реалізуються національні програми з охорони морської критичної інфраструктури, зокрема на основі підводних роботизованих апаратів для охорони портових об'єктів та підводних трубопроводів [5]. Китай активно розвиває підводні дрони для виконання завдань, пов'язаних із моніторингом морської екології та захистом від терористичних загроз.

Норвегія розвиває автономні робототехнічні системи для моніторингу підводних трубопроводів і гідротехнічних споруд з особливим акцентом на екологічні та інженерні аспекти [6]. Також активно використовуються автономні підводні апарати для оцінки ризиків, що виникають через зміни в морському середовищі та їх вплив на критичну інфраструктуру.

Таким чином, останні розробки і публікації демонструють, що сучасні рішення у галузі морської робототехніки охоронного призначення націлені на високий рівень автономії і зниження участі людини в управлінні, що дозволяє зменшити ризики та полегшити завдання в екстремальних умовах.

Очевидно, що для охорони і захисту об'єктів МКІ на цей час найбільш широко використовуються самохідні прив'язні підводні апарати-роботи (СППА, в англійській літературі – *remotely operated vehicles, ROV*) та автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, в англійській літературі – *autonomous underwater vehicles, AUV*). Кожен з цих ЗПР має свої переваги і недоліки.

Так, до важливих експлуатаційних характеристик СППА відноситься можливість оперативного відео- та телеметричного зв'язку з береговим центром керування (БЦК) морською охоронною місією,

недоліком – наявність кабель-тросу керування, що обмежує робочий радіус апарата. Крім того, для роботи на великих за площею акваторіях такі апарати можуть працювати лише з борту судна забезпечення, що суттєво знижує продуктивність морських охоронних місій та робить їх залежними від погодних умов на акваторії.

До суттєвих переваг АНПА відноситься їх великий робочий радіус та незалежність від погодних умов та судна забезпечення. Однак, суттєвим недоліком АНПА є відсутність оперативного зв'язку з БЦК на весь час виконання підводної охоронної місії.

Ефективним технічним рішенням для морських охоронних місій на мілководних об'єктах МКІ є розробка і застосування АНПА, оснащених буксируваними радіобуями (РБ), які поєднують переваги СППА та АНПА [7]. Прикладом такого технічного рішення є підводний комплекс спільного виробництва італійської компанії «Pluto» та швейцарської компанії «idRobotica» [8], рис. 1. Комплекс складається з підводного апарата-робота «Pluto Plus» з лебідкою кабель-буксира (ЛКБ) та буксируваного радіобуя (РБ) «Radio buoy».

На рис. 1 зображено: а – комплекс перед зануренням (РБ «Radio buoy» закріплений «по-похідному» у кормовій частині підводного апарата «Pluto Plus»); б – загальний вид РБ; в – робоче положення РБ «Radio buoy» під час буксирування підводним апаратом «Pluto Plus».

Підводний апарат «Pluto Plus» у базовій комплектації являє СППА з акумуляторним джерелом живлення. Апарат призначений для виконання широкого спектру підводних робіт – від підводної археології до пошуку та знешкодження морських мін.

Наявність буксируваного радіобуя надає апарату переваги АНПА (відсутність механічного зв'язку з судном забезпечення) та переваги СППА (можливість оперативної передачі підводної інформації та оперативного керування апаратом у реальному часі).

Автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм (АНПА-РБ) поєднує переваги СППА (наявність постійного інформаційного обміну між підводним апаратом і БЦК) з перевагами традиційних АНПА

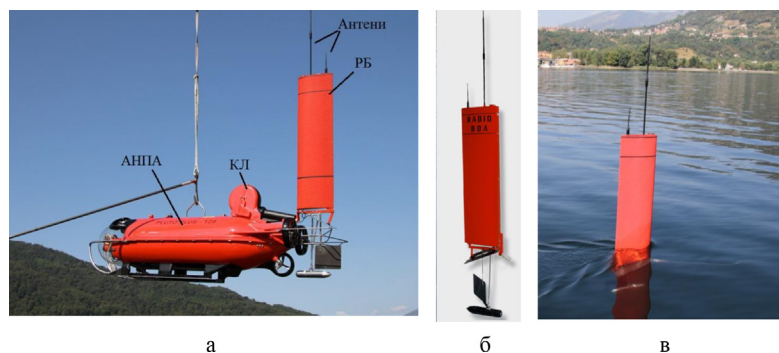


Рис. 1. Підводний комплекс у складі АНПА «Pluto Plus» та РБ «Radio buoy»

(незалежність від погодних умов та від судна забезпечення). Найбільш ефективне використання таких АНПА-РБ – наукові дослідження та пошукові роботи на невеликих за площею мілководних акваторіях.

Однак, постійне буксирування РБ призводить до неприпустимо великого споживання енергії. Це особливо важливо, коли морська місія передбачає послідовне обстеження декількох віддалених одна від одної акваторій, або автоматичне виконання підводних пошукових операцій, коли зв'язок з БЦК необхідно встановлювати тільки при виявленні підводного потенційно небезпечного предмета (ППНП). В обох цих випадках бажано, щоб РБ знаходився всередині АНПА і випускався лише за необхідності утворювати онлайн-зв'язок з БЦК.

Для реалізації таких морських місій пропонується удосконалений АНПА-РБ, який має можливість автоматично випускати РБ та повертати його до складу АНПА (рис. 2) [9].

Пропонований АНПА має торпедоподібну форму корпусу, рушійний пристрій (РП) та хвостове оперення (ХО) у складі рулів напрямку та рулів глибини. У носовій частині АНПА розташовано змінне навідне обладнання (ЗНО) для виконання підводних робіт. У кормовій частині АНПА міститься лебідка кабель-буксира (ЛКБ) та ложемент (Л) з розміщеним у ньому РБ.

Особливістю конструкції РБ є дугова форма його несучих поверхонь (крил). Кривина дуги крил РБ відповідає кривині форми зовнішнього корпусу АНПА, тому у вихідному (початковому) положенні РБ не порушує циліндричну форму зовнішнього корпусу апарата і, як наслідок, АНПА не має додаткових сил опору його руху. Це забезпечує суттєву економію витрат електроенергії бортового джерела енергії і збільшує продуктивність ЗПР.

У початковому стані РБ знаходиться всередині АНПА і закріплений на спеціальному ложементі (рис. 2, а). При необхідності організації комунікації з БЦК висувний механізм ложемента висуває РБ назовні у потік води, що набігає. Лебідка кабель-троса попускає КБ і радіобуй під дією підйомної сили, яка виникає на дугових крилах РБ у результаті його буксирування,

займає положення під поверхнею води (рис. 2, б). Одночасно з цим виконується підйом антенних пристроїв (АП) радіобуя у робоче положення. Величина заглиблення РБ регулюється системою автоматичного керування так, щоб забезпечити надводне положення його АП, необхідне для комунікації з БЦК.

Однак, для впровадження такого виду ЗПР у морську практику необхідно розв'язати низку прикладних наукових задач.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попередній аналіз показує, що до першочергових прикладних наукових завдань AST , успішний розв'язок яких дасть змогу розробляти і впроваджувати у морську практику вказаний новий вид ЗПР, варто віднести наступні дві групи завдань зовнішнього і внутрішнього проектування АНПА-РБ:

завдання зовнішнього проектування DE :

визначення експлуатаційних переваг АНПА-РБ у порівнянні з традиційними АНПА DE_{OA} ;

обґрунтування типорозмірного ряду та визначення необхідної кількості АНПА-РБ забезпечення успішної охорони та захисту об'єктів МКІ DE_{DN} ;

завдання внутрішнього проектування DI :

розробка принципів функціонування механізму розгортання (випускання) та згортання (повернення до АНПА) DI_{DPO} ;

дослідження гідродинаміки РБ як невід'ємної теоретичної складової його інженерного проектування DI_{DH} ;

розробку узагальненого алгоритму роботи системи автоматичного керування виконавчими механізмами обладнання розгортання та згортання РБ, яка має забезпечити узгоджене функціонування ложементом і лебідкою кабель-буксира DI_{DCS} .

Отримані прикладні наукові завдання, розв'язок яких забезпечить створення пропонуваного ЗПР, можна представити наступними множинами задач:

$$AST = \{DE; DI\}; \quad (1)$$

$$DE = \{DE_{OA}; DE_{DN}\}; \quad (2)$$

$$DI = \{DI_{DPO}; DI_{DH}; DI_{DCS}\}. \quad (3)$$

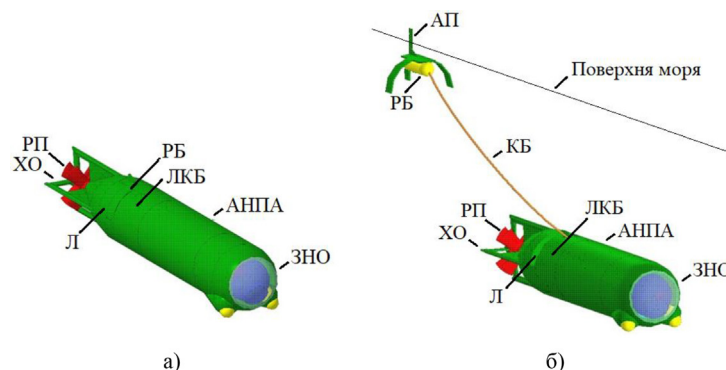


Рис. 2. Удосконалений АНПА-РБ: а – РБ в ложементі всередині АНПА; б – РБ у робочому стані

Очевидно, що розв'язок прикладних наукових завдань *AST* доцільно виконувати послідовно, починаючи з завдань зовнішнього проектування *DE* і закінчуючи завданнями внутрішнього проектування *DI*.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є формулювання завдань зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм як науково-методологічної основи створення такого засобу морської робототехніки для охорони та захисту мілководних об'єктів морської критичної інфраструктури.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети у роботі застосовано метод системного підходу – для врахування взаємодії всіх елементів підводного апарата як єдиної системи, а також їх взаємодію з зовнішнім середовищем, та метод оцінювання ефективності застосування АНПА-РБ – для оцінки технічної доцільності та економічної ефективності проектування та експлуатації такого апарата.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Сутність зовнішнього проектування АНПА-РБ

Зовнішнє проектування АНПА-РБ є початковим і визначальним етапом у процесі його створення, що передбачає формування загального технічного вигляду, архітектурно-конструктивної компоновки та головних технічних характеристик апарата як цілісного інженерного об'єкта [10]. На цьому етапі здійснюється системна ідентифікація майбутнього виробу як складної технічної системи, що функціонує в умовах змінного гідродинамічного

Сутність зовнішнього проектування полягає у встановленні основних принципів побудови апарата, які забезпечують досягнення необхідних техніко-експлуатаційних показників, з урахуванням функціонального призначення та умов застосування. Для АНПА-РБ, що призначені для виконання технічних робіт із забезпечення охорони об'єктів МКІ, ці принципи повинні забезпечувати можливість виконання пошукових, картографічних, інспекційних та транспортних операцій у складних мілководних умовах, де застосування водолазів є небезпечним або економічно недоцільним, виходячи з міркувань продуктивності.

На етапі зовнішнього проектування АНПА-РБ виконується визначення:

цільового призначення апарата, які він має виконувати в складі комплексу засобів охорони МКІ (задача DE_{OA-J});

умов експлуатації, включаючи глибини, течії, прозорість води, наявність донних відкладень та штучних перешкод (задача DE_{OA-T});

основних геометричних характеристик корпусу – архітектурно-конструктивний тип апарата і його РБ, масо-габаритні характеристики тощо (задача DE_{OA-H});

гідродинамічної схеми, що визначає рухливість, маневреність і стійкість апарата (задача DE_{OA-M});

попередньої схеми розміщення функціональних модулів – енергетичного, навігаційного, комунікаційного, пошукового, сенсорного та маніпуляційного (задача DE_{OA-C});

попереднього енергетичного балансу, що дозволяє оцінити тривалість автономної роботи АНПА-РБ (задача DE_{OA-E});

попередніх показників інформаційно-комунікаційних можливостей АНПА-РБ (задача DE_{OA-I});

інтеграційних вимог до взаємодії з надводними або береговими пунктами управління (задача DE_{OA-TW}), оскільки АНПА-РБ має бути елементом комплексної морської робототехнічної системи спостереження, контролю та захисту об'єктів МКІ, що забезпечує реалізацію концепції ситуаційної поінформованості та безперервного контролю простору у зоні охорони.

Тоді завдання DE_{OA} зовнішнього проектування АНПА-РБ можна представити у вигляді наступної множини задач:

$$DE_{OA} = \{DE_{OA-J}; DE_{OA-T}; DE_{OA-H}; DE_{OA-M}; DE_{OA-C}; DE_{OA-E}; DE_{OA-I}; DE_{OA-TW}\}. \quad (4)$$

Таким чином, зовнішнє проектування визначає концептуальну модель АНПА-РБ – його архітектуру, функціональні можливості, конструктивні межі й потенціал автоматизації та інтеграції до складу систем захисту об'єктів МКІ більш високих рівнів. Цей етап поєднує елементи системного аналізу, гідромеханіки, теорії та проектування суден, ергономіки (у випадку дистанційного управління) та теорії автоматичного керування.

Розглянемо тепер особливості розв'язку задач множини (4) зовнішнього проектування АНПА-РБ.

Зовнішнє проектування АНПА-РБ, який виконує технічні роботи в інтересах охорони МКІ на мілководних морських акваторіях, доцільно представити деякою множиною взаємопов'язаних задач, що ґрунтуються на застосуванні методології системного підходу [11, 12].

Згідно з цим множину задач (4) представимо чотирма основними підмножинами (індекс «*OA*» опускаємо для спрощення аналітичних записів):

$$DE_M = \{DE_{OA-H}; DE_{OA-M}; DE_{OA-C}\}; \quad (5)$$

$$DE_E = \{DE_{OA-E}\}; \quad (6)$$

$$DE_I = \{DE_{OA-I}\}; \quad (7)$$

$$DE_{K\Phi} = \{DE_{OA-J}; DE_{OA-T}; DE_{OA-TW}\}, \quad (8)$$

де: DE_M – підмножина конструктивно-компоновочних та гідродинамічних задач (критерій системного

підходу «Матерія»); DE_E – підмножина задач енергетики підводного апарата (критерій системного підходу «Енергія»); DE_I – підмножина інформаційно-комунікаційних та керуючих задач (критерій системного підходу «Інформація»); $DE_{K\Phi}$ – підмножина задач ефективного застосування АНПА-РБ за призначенням (критерій системного підходу «Корисна функція»).

Розглянемо послідовно особливості розв'язку вказаних задач.

Підмножина задач DE_M розв'язується відомими методами конструювання ЗПР [13, 14], проте, з урахуванням наступних особливостей:

для задачі DE_{OA-H} визначення основних геометричних характеристик корпусу – має бути враховано, що АНПА-РБ має два основних режими експлуатації (рух АНПА як твердого тіла в рідині та рух АНПА-РБ в рідині як системи двох твердих тіл та гнучкого тіла (КБ), які мають силову взаємодію у потоці води);

для задачі DE_{OA-M} визначення гідродинамічної схеми, що визначає рухливість, маневреність і стійкість апарата – має бути враховано, що експлуатація АНПА-РБ буде виконуватись у вказаних вище двох основних режимах, що вимагає застосування просторової моделі руху системи у складі двох твердих та одного гнучкого тіла у потоці води; при цьому слід також враховувати, що такий рух буде виконуватись в умовах зміни довжини попущеної частини КБ з-за зміни глибини морської акваторії та при зміні центру мас РБ з-за підйому/опускання його антенних пристроїв;

для задачі DE_{OA-C} визначення попередньої схеми розміщення функціональних модулів АНПА та РБ – має бути враховано, що прийняті конструктивно-технічні рішення мають забезпечувати зручність технічного обслуговування, транспортування та зберігання АНПА-РБ.

Розв'язок задачі DE_{OA-E} підмножини DE_E має на меті оцінити переваги АНПА-РБ на ринку ЗПР в плані його енергетичної автономності. Особливістю розв'язку цієї задачі є розробка методики оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу АНПА-РБ, яка матиме місце під час періодичного руху підводного апарата без радіозв'язку з БЦК. Зазначена методика має ґрунтуватись на теоретичній циклограмі окремих режимів роботи АНПА-РБ, які необхідні для виконання заданої морської охоронної місії.

Розв'язок задачі DE_{OA-I} підмножини DE_I має дати оцінку переваг інформаційно-комунікаційних характеристик АНПА-РБ на ринку ЗПР. Тут попередньо виконується оцінка систем навігації, автоматичного керування АНПА-РБ та його зв'язку з БЦК. Метою є оцінка попередніх проектних рішень щодо забезпечення необхідної точності позиціонування, надійності зв'язку та ефективності системи автоматичного керування АНПА-РБ.

Задачі DE_{OA-J} ; DE_{OA-T} ; DE_{OA-TW} підмножини задач $DE_{K\Phi}$ ефективного застосування АНПА-РБ

за призначенням на етапі зовнішнього проектування розглянемо більш детально, оскільки саме їх розв'язки найбільш суттєво впливають на оцінку перспективності застосування нового виду ЗПР.

Попередній аналіз свідчить, що задача DE_{OA-J} визначення цільового призначення АНПА-РБ, може бути сформульована у вигляді наступних основних підзадач:

підзадачі DE_{OA-J-O} спостереження за підводною та надводною обстановкою з метою своєчасного виявлення потенційних загроз природного, техногенного або антропогенного походження;

підзадачі $DE_{OA-J-TCC}$ контролю технічного стану підводних і донних елементів МКІ, зокрема трубопроводів, кабелів зв'язку, портових споруд, енергетичних об'єктів;

підзадачі $DE_{OA-J-ACI}$ автоматизованого патрулювання та збору інформації в межах заданого морського району;

підзадачі $DE_{OA-J-DT}$ передачі телеметричних і навігаційних даних через буксирований радіобуй для забезпечення стійкого каналу зв'язку з БЦК;

підзадачі $DE_{OA-J-ISS}$ інтеграції з системами охорони МКІ, включаючи берегові центри моніторингу, безекіпажні надводні судна (БНС) і стаціонарні сенсорні вузли.

Додатковий аналіз підмножини задач $DE_{K\Phi}$ зовнішнього проектування ЗПР, що пропонується, вказує на доцільність уведення у розгляд ще однієї задачі, розв'язок якої буде сприяти більш повній оцінці ефективності АНПА-РБ – підзадачі DE_{OA-J-J} оцінки переліку основних робіт, які має виконувати АНПА-РБ.

Попередньо тут варто вказати на наступні роботи, які може виконувати АНПА-РБ, які у значній мірі збігаються з роботами по гуманітарному розмінуванню акваторій [15]:

пошук, ідентифікація та картографування небезпечних або несанкціоновано розміщених об'єктів на акваторії, яка охороняється;

нейтралізація небезпечних або несанкціоновано розміщених об'єктів на місці їх виявлення (маркування шляхом встановлення сигнального буя, знешкодження на місці чи укривання захисною конструкцією);

підводне транспортування таких об'єктів до місця тривалого та безпечного підводного зберігання;

документальне обстеження очищеної від небезпек акваторії для подальшої безпечної експлуатації об'єктів МКІ.

Особливу увагу під час зовнішнього проектування необхідно приділити перевагам АНПА-РБ у наступних двох варіантах реалізації охоронних місій:

наявності неперервного зв'язку АНПА-РБ з БЦК при необхідності участі оператора підводного апарата у безпосередньому керуванні його роботою за переліком DE_{OA-J-J} ;

можливості виконувати значну частину підводних місій апарата з мінімальними енерговитратами завдяки знаходженню його РБ в ложементі всередині АНПА.

Наступною складовою підмножини задач DE_{KF} є задача DE_{OA-T} визначення умов експлуатації АНПА-РБ. Виходячи з практичного досвіду колективу Науково-дослідного інституту підводної техніки (НДІ ПТО Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, отриманого у напрямку застосування ЗПР при виконанні науково-дослідних, пошуково-обстежувальних та природоохоронних робіт, можна сформулювати наступні конкретні умови роботи такої техніки, які враховують як гідрокліматичні умови (підзадача $DE_{OA-T,HC}$), так і умови технічного обслуговування АНПА-РБ (підзадача $DE_{OA-T,MC}$).

Вказані умови зведемо у формі табл. 1.

Таблиця 1. Приклад формулювання умов експлуатації АНПА-РБ

Параметр	Типові умови експлуатації
Гідрокліматичні умови (підзадача $DE_{OA-T,HC}$)	
Глибина акваторії	до 100 м
Тип донної поверхні	піщане, мулисте, глинисте; наявні донні відкладення різної щільності
Швидкість течії	до 1,5 м/с (корекція алгоритмами стабілізації)
Температура води	від -2°C до $+30^{\circ}\text{C}$
Солоність	10–35 ‰
Прозорість води	0,5–15 м залежно від сезону та гідрології
Вітрове хвилювання (на поверхні)	до 3 балів за шкалою Бофорта
Наявність штучних перешкод	палі, підводні комунікації, залишки конструкцій, риболовні сітки, суднові якірні системи
Робоча тривалість місії	до 24 годин у автономному режимі
Умови технічного обслуговування (підзадача $DE_{OA-T,MC}$)	
Транспортування апарата	транспортний модуль
Вантажні операції	спуско-піднімальний пристрій
Керування і контроль	береговий та/або мобільний центр керування
Технічне обслуговування	модуль зберігання та технічного обслуговування

Наведений вище приклад може слугувати основою для порівняльного аналізу ефективності АНПА охоронного призначення різних типів.

Нарешті, ще однією важливою складовою підмножини задач DE_{KF} є задача DE_{OA-TW} визначення інтеграційних вимог до взаємодії з надводними або береговими пунктами управління.

Аналіз сучасного світового та вітчизняного досвіду створення й експлуатації надводних автономних морських платформ різного призначення свідчить,

що задачу DE_{OA-TW} доцільно розв'язувати у складі чотирьох наступних підзадач:

підзадача $DE_{<SUB>OA-TW-CDE}$ забезпечення зв'язку та обміну даними з БЦК, яка включає забезпечення двостороннього зв'язку через буксирований радіобуй з дальністю до 10 км від БЦК та можливість передачі телеметрії, відео- або гідроакустичних даних у реальному часі;

підзадача $DE_{OA-TW-ICP}$ інтеграції з береговими та мобільними (надводними та повітряними) пунктами управління, яка включає взаємодію з надводними ретрансляторами (БНС) для розширення зони зв'язку та підтримку стандартів NATO STANAG 4586 або їхніх національних аналогів;

підзадача $DE_{OA-TW-SC}$ сумісності сенсорних даних, яка включає взаємодію з надводними ретрансляторами (носії – надводні судна або літальні апарати) для збільшення дальності зв'язку, синхронізацію даних із навігаційних систем (INS, USBL, DVL), яка необхідна для узгодження в часі та координатах інформації від різних навігаційних сенсорів ЗПР з метою формування єдиної, узгодженої та достовірної оцінки його положення, швидкості та орієнтації у просторі;

підзадача $DE_{OA-TW-ACR}$ оцінки ефективності системи автоматичного керування, яка включає оцінку можливості адаптивного коригування траєкторії за умов течій та обмеженої підводної та надводної навігації, а також можливості дистанційної зміни алгоритмів місії з БЦК.

Тобто, на етапі зовнішнього проектування АНПА-РБ основні складові підмножини задач DE_{KF} за критерієм системного підходу «Корисна функція» (8) можна представити наступними підзадачами:

$$DE_{OA-J} = \{DE_{OA-J-O}; DE_{OA-J-TCC}; DE_{OA-J-ACI}; DE_{OA-J-J}; DE_{OA-J-DT}; DE_{OA-J-ISS}; DE_{OA-J-J}\}; \quad (9)$$

$$DE_{OA-T} = \{DE_{OA-T,HC}; DE_{OA-T,MC}\}; \quad (10)$$

$$DE_{OA-TW} = \{DE_{OA-TW-CDE}; DE_{OA-TW-ICP}; DE_{OA-TW-SC}; DE_{OA-TW-ACR}\}. \quad (11)$$

Таким чином, завдання DE_{OA} визначення експлуатаційних переваг АНПА-РБ у порівнянні з традиційними АНПА, які на етапі зовнішнього проектування має виконувати розробник ЗПР цього виду, полягають у розв'язку підмножин задач (5)–(8) та підзадач (9)–(11).

Наступним завданням зовнішнього проектування АНПА-РБ згідно (2) є обґрунтування типорозмірного ряду АНПА-РБ та визначення необхідної їх кількості для забезпечення успішної охорони та захисту об'єктів МКІ.

Виходячи з досвіду НДІ ПТ, напрацьованому у морських експедиціях по обстеженню морських стаціонарних платформ та підводних магістральних газопроводів, для охорони мілководних об'єктів МКІ доцільно передбачити такі класи підводних апаратів:

Таблиця 2. Орієнтовна потреба у спеціальних засобах морської робототехніки для охорони об'єктів морської інфраструктури України

Об'єкт охорони	Протяжність / площа	Кількість АНПА-РБ	Основні типи апаратів
Морські порти (Одеса, Южний, Миколаїв, Херсон, Ізмаїл, Чорноморськ)	від 5 км до 30 км берегової лінії	5–10 на порт 6 = 30–60	ППА, ІКА
Суднохідні фарватери (Дунай, Дніпро, Південний Буг, Дністровський лиман)	до 1000 км	20–30	ППА, МТА
Морські стаціонарні платформи та бурові вежі	до 10 об'єктів	2–3 на об'єкт 20–30	ІКА, МТА
Підводні трубопроводи і кабелі зв'язку	понад 200 км	10–15	ППА, ІКА
Райони мінної небезпеки на мілководних акваторіях Чорного моря	до 500 км ²	15–20	ППА, ІКА, МТА

пошукові підводні апарати (ППА) — для відео-обстеження, магнітометричного та гідроакустичного зондування підводного середовища, побудови карт рельєфу донної поверхні, пошуку підводних потенційно небезпечних предметів (ППНО);

ідентифікаційно-картографічні апарати (ІКА) — для детального оптичного, гідроакустичного та магнітометричного обстеження виявлених ППНО, класифікації та картографування;

маніпуляційно-транспортні апарати (МТА) — для захоплення, переміщення та транспортування ППНО до зон тривалого безпечного зберігання та/чи знешкодження.

Розрахунок кількості необхідних роботизованих засобів залежить від площі або протяжності об'єктів охорони, необхідної швидкості їх обстеження та рівня допустимого ризику. На основі аналізу основних об'єктів морської інфраструктури України можна визначити орієнтовну потребу в АНПА-РБ (табл. 2).

Таким чином, для охорони і захисту об'єктів МКІ України необхідно від 95 до 155 підводних апаратів типу АНПА-РБ. Це свідчить про актуальність завдання створення такого виду ЗПР для України та про необхідність подальших прикладних наукових досліджень за цим напрямком.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження, присвяченого формулюванню завдань зовнішнього проектування підводного робота для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях, отримано такі основні висновки.

1. Застосування системного підходу до зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм забезпечує комплексний розгляд взаємопов'язаних технічних, інформаційних, енергетичних та експлуатаційних факторів, що впливають на ефективність створення та функціонування засобів морської робототехніки нового покоління.

2. На основі аналізу функціонального призначення АНПА-РБ для роботи у мілководних зонах сформульовано чотири взаємопов'язані підмножини завдань зовнішнього проектування, а саме:

конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, спрямовані на визначення оптимальних форм, розташування модулів та характеристик руху АНПА-РБ у морському середовищі;

завдання енергетики АНПА-РБ, які стосуються розробка методики оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу АНПА-РБ, яка матиме місце під час періодичного руху підводного апарата без радіозв'язку з БЦК;

інформаційно-комунікаційні та керуючі завдання, що включають оцінку попередніх проектних рішень щодо забезпечення необхідної точності позиціонування, надійності зв'язку та ефективності системи автоматичного керування АНПА-РБ;

завдання ефективного застосування, які охоплюють визначення цільового призначення АНПА-РБ та формування переліку основних робіт, які має виконувати АНПА-РБ, включаючи визначення принципів взаємодії з іншими морськими платформами та береговими центрами управління.

3. Сформульовані підмножини завдань утворюють науково-методологічну основу зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм, яка може бути використана для оцінки перспективності його створення та визначення технічних вимог до подальших етапів внутрішнього проектування.

4. Отримані результати закладають методологічне підґрунтя для внутрішнього проектування АНПА-РБ, у тому числі й наукового обґрунтування конструкції буксируваного радіобує та складу обладнання механізму його випускання та повернення до АНПА.

5. Таким чином, проведено дослідження формує науково обґрунтовану базу для створення нового класу підводних робототехнічних комплексів, здатних ефективно функціонувати у мілководних морських акваторіях, забезпечуючи підвищений рівень ситуаційної обізнаності, надійності зв'язку та стійкості до зовнішніх впливів у складі інтегрованих систем охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури України.

REFERENCES

- [1] U.S. Navy Unmanned Maritime Autonomy Architecture (UMAA), auvsi.org/advocacy/advocacy-initiatives/unmanned-maritime-autonomy-architecture/
- [2] NOC's Marine Robotics Innovation Centre. https://noc.ac.uk/news/nocs-marine-robotics-innovation-centre?gad_source=1&gad_campaignid=19651672028&gbraid=0AAAApOYD3x1p0cKc-xjGsiMMA8m8UtOx&gclid=Cj0KCQjwo63HBhCKARIsAHOHV_UAIqC60CnBaHp67T1VuWedfNcfCYPW5owA7VI56GH9gEXnyeRoX-4aAjlTEALw_wcB
- [3] Underwater robot could improve pipeline and cable security. <https://www.gov.uk/government/news/underwater-robot-could-improve-pipeline-and-cable-security>
- [4] Technology and Innovation in UK Maritime: The case of Autonomy. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5e85cad486650c744088a06e/technology-innovation-route-map-document.pdf>
- [5] China's Maritime Strategy: Next Generation Technologies and the Future of South China Sea Security. <https://nspcbatten.org/chinas-intelligentized-maritime-strategy-next-generation-technologies-and-the-future-of-south-china-sea-security/>
- [6] Asgeir J. Sørensen, Martin Ludvigsen. Towards Integrated Autonomous Underwater Operations. IFAC-PapersOnLine 48-2 (2015) 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.018>
- [7] Race, Roger R. Jacob C. Piskura and David S. Sanford. "Towed antenna system and method". U.S. Patent No 8,813,669. 26 Aug. 2014.
- [8] Nishida Yuya et al (2015). Development of an autonomous buoy system for AUV OCEANS 2015. Genova (IEEE). DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271614
- [9] Blintsov, V. S., Tarchuk, A. A., & Trybulkevych, V. V. (2024). *Design tasks for the creation of marine robotic systems for protection and defense of marine critical infrastructure facilities*. Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy, 1(28), 79–91. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091>
- [10] Blintsov, V. S., & Kutsenko, P. S. (2020). *Application of the system approach during external design of unmanned towed underwater systems*. Mechanics of Gyroscopic Systems, (39), 105–132. <https://doi.org/10.20535/0203-377110>
- [11] The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools. Safety Dynamics, 2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-96259-7_1
- [12] Blintsov V. S., Klochkov O. P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal "EUREKA: Physics and Engineering"*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43–51. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00878
- [13] Ryzhkov, S. S., Blintsov, V. S., Yehorov, H. V., Zhukov, Yu. D., Kvasnytskyi, V. F., Koshkin, K. V., Krivtsun, I. V., Nekrasov, V. O., Sevriukov, V. V., & Solonichenko, Yu. V. (2011). *Creation of universal transport vessels and ocean engineering means* (Monograph, Ed. S. S. Ryzhkov). Mykolaiv : National University of Shipbuilding Publishing House.
- [14] Nekrasov, V. (2019). *Conceptual Design of Ships*. Kyiv-Kherson : Oldi-Plus, 112 p. [in English].
- [15] Blintsov, V. S., & Nadochy, A. V. (2024). *Humanitarian demining of shallow-water areas: Technologies and robotic support*. Shipbuilding and Marine Infrastructure, 1(18), 4–10. [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01)

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] U.S. Navy Unmanned Maritime Autonomy Architecture (UMAA) Retrieved from <http://auvsi.org/advocacy/advocacy-initiatives/unmanned-maritime-autonomy-architecture/>
- [2] NOC's Marine Robotics Innovation Centre. Retrieved from https://noc.ac.uk/news/nocs-marine-robotics-innovation-centre?gad_source=1&gad_campaignid=19651672028&gbraid=0AAAApOYD3x1p0cKc-xjGsiMMA8m8UtOx&gclid=Cj0KCQjwo63HBhCKARIsAHOHV_UAIqC60CnBaHp67T1VuWedfNcfCYPW5owA7VI56GH9gEXnyeRoX-4aAjlTEALw_wcB
- [3] Underwater robot could improve pipeline and cable security. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/news/underwater-robot-could-improve-pipeline-and-cable-security>
- [4] Technology and Innovation in UK Maritime: The case of Autonomy. Retrieved from <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5e85cad486650c744088a06e/technology-innovation-route-map-document.pdf>
- [5] China's Maritime Strategy: Next Generation Technologies and the Future of South China Sea Security. Retrieved from <https://nspcbatten.org/chinas-intelligentized-maritime-strategy-next-generation-technologies-and-the-future-of-south-china-sea-security/>
- [6] Asgeir J. Sørensen, Martin Ludvigsen. Towards Integrated Autonomous Underwater Operations. IFAC-PapersOnLine 48-2 (2015) 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.018>
- [7] Race, Roger R. Jacob C. Piskura and David S. Sanford. « Towed antenna system and method». U.S. Patent No 8,813,669. 26 Aug. 2014.
- [8] Nishida Yuya et al (2015). Development of an autonomous buoy system for AUV OCEANS 2015. Genova (IEEE). DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271614
- [9] Блінцов В. С., Тарчук А. А., Трибулькевич В. В. Проектні задачі створення засобів морської робототехніки для охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії* № 1 (28), 2024. С. 79-91. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091

- [10] Блінцов В. С., Куценко П. С. Застосування системного підходу під час зовнішнього проєктування ненаселених буксируваних підводних систем. *Механіка гіроскопічних систем*. 2020. № 39. С. 105–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377110>
- [11] The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools. Safety Dynamics, 2018. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-96259-7_1
- [12] Blintsov V. S., Klochkov O. P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal "EUREKA: Physics and Engineering"*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43–51. doi:10.21303/2461-4262.2019.00878
- [13] Рижков С. С., Блінцов В. С., Єгоров Г. В., Жуков Ю. Д., Квасницький В. Ф., Кошкін К. В., Кривцун І. В., Некрасов В. О., Севрюков В. В., Солоніченко Ю. В. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія, за ред. С. С. Рижкова. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. 340 с.
- [14] Nekrasov, V. (2019). *Conceptual Designins of Ships*. Kyiv-Kherson : Oldi-Plus, 112 p.
- [15] Блінцов В. С., Надточий А. В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення. *Суднобудування та морська інфраструктур*. 2024. Вип. №1(18). С. 4–10. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01)

© Блінцов В. С., Тарчук А. А.

Дата надходження статті до редакції: 12.06.2025

Дата затвердження статті до друку: 29.06.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0