

УДК 629.362

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-184-201

## АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ НАДВОДНИХ АПАРАТІВ

**Д.А. Бурлаченко**

ORCID ID: 0000-0003-3749-4908

**О.Я. Пастернак**

ORCID ID: 0000-0001-5174-3371

**І.О. Пуляєв**

ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

**С.В. Заяц**

ORCID ID: 0000-0001-5074-7864

**О.П. Чеча**

ORCID ID: 0000-0001-7155-6143

**Г.С. Щенявський**

ORCID ID: 0000-0001-7803-978X

старші викладачі кафедри судноводіння і морської безпеки

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Стаття представляє комплексне дослідження систем енергопостачання для безпілотних надводних апаратів (БнНА) з акцентом на їхню надійність, ефективність та стійкість.

Проаналізовано сучасний стан технологій енергопостачання та визначено технічні виклики, пов'язані з автономними морськими операціями. У дослідженні оцінюються різні джерела енергії, включаючи сонячні панелі, літій-іонні та літій-полімерні акумулятори, а також гібридні системи.

Розрахунки прогнозують споживання енергії за різних сценаріїв експлуатації, підкреслюючи необхідність розробки ефективних стратегій управління енергією та допомагають проектувати системи, які можуть задовольнити специфічні енергетичні потреби для виконання різних місій.

Результати дослідження надають практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності, автономності та надійності БнНА, підкреслюючи важливість інновацій та співпраці у подоланні викликів, з якими стикається морська індустрія.

**Ключові слова:** безпілотні надводні апарати, морський транспорт, системи енергопостачання, автономні системи управління, енергоефективність, сонячні батареї, гібридні системи, надійність, стійкість, морські технології.

UDC 629.362

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-184-201

ASPECTS OF IMPROVING THE RELIABILITY  
OF UNMANNED SURFACE VEHICLES

**Dementiy Burlachenko**

ORCID ID: 0000-0003-3749-4908

**Oleg Pasternak**

ORCID ID: 0000-0001-5174-3371

**Igor Pulyaev**

ORCID ID: 0000-0002-0592-032X

**Sergiy Zayats**

ORCID ID: 0000-0001-5074-7864

**Oleksandr Checha**

ORCID ID: 0000-0001-7155-6143

**Gennady Scheniavskiy**

ORCID ID: 0000-0001-7803-978X

Senior Lecturers at the Department of Navigation and Maritime Safety

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The article presents a comprehensive study of power supply systems for unmanned surface vehicles (USVs) with an emphasis on their reliability, efficiency and sustainability.*

*The current state of the art of power supply technologies is analyzed and the technical challenges associated with autonomous maritime operations are identified. The study evaluates various energy sources, including solar panels, lithium-ion and lithium-polymer batteries, and hybrid systems.*

*The calculations predict energy consumption under different operational scenarios, emphasizing the need to develop effective energy management strategies and help design systems that can meet the specific energy needs of different missions.*

*The results of the study provide practical recommendations for improving the energy efficiency, autonomy, and reliability of USVs, emphasizing the importance of innovation and collaboration in overcoming the challenges faced by the maritime industry.*

**Keywords:** *unmanned surface vehicles, maritime transport, energy supply systems, autonomous control systems, energy efficiency, solar panels, hybrid systems, reliability, sustainability, maritime technologies.*

**Вступ.** Безпілотні надводні апарати (БпНА) або USV (unmanned surface vehicles) привернули до себе значну увагу в останні роки завдяки своєму потенціалу революціонізувати морські операції. Ці автономні судна можуть виконувати широкий спектр завдань – від збору океанографічних даних і моніторингу навко-

лишнього середовища до пошуково-рятувальних місій і операцій з морської охорони. Інтеграція передових технологій в USV не лише підвищує операційну ефективність, але й знижує ризики, пов'язані з перебуванням людини в небезпечному середовищі. Зі зростанням попиту на автономні морські рішення зростає і потреба в міцних і надійних системах енергопостачання, здатних забезпечити безперебійну роботу безпілотних апаратів протягом тривалого часу.

За останні роки технології БпНА зазнали значного розвитку, що вплинуло на різні аспекти енергопостачання та експлуатаційної ефективності. Всебічний огляд розробок USV, підкреслюючи їх технологічну еволюцію [1] та дослідження використання БпНА для вивчення водної структури [2; 10], систем управління [3] підкреслюють необхідність надійних джерел енергії та методів управління для забезпечення експлуатаційної ефективності. Всебічний аналіз алгоритмів планування маршрутів [4] і розподілу багатозадачності [6; 7; 19] ще більше розширює експлуатаційні можливості БпНА.

Зусилля, спрямовані на підвищення екологічної безпеки судноплавства, знаходять своє відображення в розробці заходів щодо зменшення експлуатаційного забруднення та ефективного управління баластними водами [26; 27; 30]. Аналіз технічних викликів у сфері енергопостачання та управління енергією, включаючи використання сонячних панелей, акумуляторів та гібридних систем, має вирішальне значення для підтримки автономності та ефективності USV [5]. Крім того, для оптимізації енергоспоживання необхідні моделі та розрахунки для прогнозування споживання енергії та попиту на неї за різних сценаріїв експлуатації [8].

Роль інтелектуального розподілу завдань і планування також вивчається з використанням самоорганізаційних карт і методів [11; 18; 19]. Поєднання мульти-сенсорних даних для навігації [12] і аналіз методів виявлення суден з урахуванням навколишнього середовища і сегментації водних шляхів для БпНА [18; 22] висвітлюють технологічні досягнення в інтеграції сенсорів і екологічній обізнаності. Дослідження методів уникнення аварійних зіткнень [14] і впливу ройової поведінки БпНА [8; 20] підкреслюють потребу в надійних заходах безпеки.

Дослідження важливості застосування БпНА в різних сферах, таких як моніторинг довкілля та рятувальні операції, демонструють їхню універсальність [5; 9; 15; 17, 23]. Застосування технології «цифрових двійників» в БпНА [16] і розробка інтелектуальних механізмів управління, таких як механізм самоутримання і метод блокування розвороту [11; 26-28], сприяють підвищенню експлуатаційної надійності БпНА.

Основною метою цього дослідження є вивчення та оцінка деяких аспектів експлуатаційної надійності БпНА та систем їх живлення для зосередження на забезпеченні їхнього ефективного функціонування.

**Постановка проблеми.** Безпілотні надводні апарати (БпНА) представляють значний потенціал для покращення ефективності та безпеки морських операцій. Однак, їх широке впровадження стикається з рядом технічних та операційних викликів, які потребують детального аналізу та вирішення. Основні проблеми функціонування БпНА включають:

1. Енергопостачання для забезпечення стабільного та ефективного функціонування є критично важливим для автономної роботи БпНА. Сучасні джерела живлення, такі як акумулятори та сонячні панелі, мають обмеження щодо ємності та тривалості роботи, що впливає на тривалість місії та продуктивність апаратів.

2. Надійність роботи систем управління та датчиків для забезпечення безпечної експлуатації БпНА, зі здатністю працювати в суворих морських умовах без збоїв.

3. З ростом технологічної складності БпНА зростають і ризики кіберзагроз. Зловмисні атаки на системи управління можуть призвести до втрати контролю над апаратом, створюючи небезпеку для суден і навколишнього середовища.

4. Системні збої та втрата зв'язку адже робота БпНА в динамічних морських умовах вимагає постійного зв'язку та здатності швидко реагувати на зміни у навколишньому середовищі. Втрата зв'язку чи системні збої можуть призвести до зниження ефективності роботи та підвищення ризику аварій.

Рішення цих проблем вимагає комплексного підходу, який включає розробку ефективних систем енергозабезпечення, покращення надійності управління та датчиків, а також впровадження заходів з кібербезпеки. Тільки такий підхід дозволить максимально реалізувати потенціал БпНА в морських операціях та забезпечити їх безпечно і ефективно функціонування.

**Мета статті.** Метою статті є комплексне дослідження систем енергопостачання для безпілотних надводних апаратів (БпНА) з акцентом на їхню надійність, ефективність та стійкість. Основні завдання включають аналіз сучасних технологій енергопостачання, визначення основних проблем енергозабезпечення та енергоспоживання, вивчення впливу екологічних факторів та розробку рекомендацій щодо покращення енергоефективності. Стаття має на меті надати практичні рекомендації та сприяти подальшому розвитку технологій енергопостачання для БпНА, забезпечуючи їхню ефективну і безпечну експлуатацію в морських умовах.

**Результати досліджень.** Розробка систем автономного керування для БпНА пов'язана з низкою складних завдань адже сучасні технології включають різні алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для забезпечення автономного керування БпНА. Ці системи повинні виконувати такі завдання, як навігація, об'їзд перешкод і виконання місії без втручання людини втім існують перманентні проблеми, які потребують постійного пошуку для їх ефективного вирішення (таблиця 1).

Підтримання надійного зв'язку з БпНА у віддалених морських районах має важливе значення для ефективного моніторингу, управління та проведення операцій. Обширний і часто непередбачуваний характер морського середовища створює значні труднощі для встановлення і підтримки надійного зв'язку.

Таблиця 1

*Розвиток автономних систем управління*

| Аспект                          | Опис  |
|---------------------------------|---|
| Складність морського середовища | Непередбачувані умови середовища, включаючи хвилі, течії та погодні умови, становить значний виклик для автономних систем, які повинні мати певний ступінь надійності, щоб адаптуватися до мінливих умов у режимі реального часу. |
| Обробка даних                   | Необхідність обробки великих обсягів даних з різних датчиків у режимі реального часу для забезпечення їх ефективного аналізу та інтерпретації системою.   |
| Безпека та надійність           | Забезпечення високонадійної та відмовостійкої роботи що передбачає широке тестування та перевірку для гарантії того, що БпНА можуть безпечно працювати за будь-яких умов.   |

Надійний зв'язок має вирішальне значення для передачі навігаційних даних, отримання команд і забезпечення загальної безпеки та ефективності операцій з використанням БпНА. Проте, існує кілька невід'ємних проблем, пов'язаних із забезпеченням цього зв'язку у віддалених морських районах.

Таблиця 2

*Забезпечення зв'язку у віддалених районах*

| Аспект                                     | Опис   |
|--|--|
| Покриття сигналу                           | У віддалених морських районах часто відсутня інфраструктура для безперервного зв'язку, що призводить до потенційної втрати сигналу або перешкод. |
| Пропускна здатність і затримка             | Система зв'язку повинна підтримувати високу пропускну здатність і низьку затримку для ефективної передачі даних між БпНА і центром управління.   |
| Механізми резервування та відмовостійкості | Забезпечення безперервного зв'язку вимагає надійного резервування та механізмів обходу відмови, щоб впоратися з будь-якими збоями.               |

Датчики, що використовуються на БпНА, повинні відповідати певним технічним вимогам, щоб ефективно функціонувати в складному морському середовищі. Ці датчики мають вирішальне значення для навігації, виявлення перешкод, моніторингу навколишнього середовища та збору даних. Проте розробка і впровадження датчиків для БпНА в морських умовах також пов'язана з кількома ключовими проблемами (таблиця 3):

Таблиця 3

*Вимоги до системи датчиків для морського середовища*

| Аспект                     | Опис   |
|----------------------------|--|
| Довговічність і надійність | Датчики повинні витримувати суворі морські умови, включаючи корозію від солоної води, високий тиск і екстремальні температури. |
| Точність і акуратність     | Датчики повинні забезпечувати точні і достовірні вимірювання в різних умовах для гарантування правильної роботи БПНА.          |
| Інтеграція та калібрування | Інтеграція декількох датчиків і забезпечення їх правильного калібрування для їх ретельного проктування і тестування.           |

Основні проблеми безпеки функціонування, пов'язані з безпілотними технологіями в морських умовах, включають ризик зіткнень, системні збої та втрату зв'язку. Ці апарати працюють у складних і динамічних умовах, де вони повинні оминати перешкоди, уникати інших суден і витримувати суворі погодні умови. Нездатність прогнозувати та реагувати на раптові зміни в навколишньому середовищі може призвести до аварій та пошкоджень. Крім того, загрози кібербезпеки становлять значні ризики, оскільки зловмисні атаки на системи управління можуть поставити під загрозу безпеку і функціональність підводних апаратів.

Надійність систем управління та датчиків має першорядне значення для безпечної експлуатації БпНА. Системи управління повинні постійно виконувати свої функції без збоїв, забезпечуючи ефективну навігацію та виконання місій. Датчики, які надають необхідні дані для навігації, виявлення перешкод і моніторингу навколишнього середовища, повинні бути високоточними і стійкими до суворих морських умов. Будь-яка несправність цих компонентів може призвести до прийняття неправильних рішень і потенційно небезпечних ситуацій. Тому ретельне тестування та валідація цих систем мають важливе значення для забезпечення їхньої надійності.

Підвищення надійності безпілотних технологій включає в себе кілька підходів і методів, вирішення яких дозволяє значно підвищити надійність і безпеку безпілотних надводних апаратів, забезпечивши їх ефективну і безпечну експлуатацію в різних морських умовах:

1. Резервування та відмовостійкі системи. Впровадження резервних систем гарантує, що якщо один компонент виходить з ладу, інший може взяти на себе його функцію, тим самим знижуючи ризик повного виходу системи з ладу. Механізми відмовостійкості призначені для переведення транспортного засобу в безпечний стан у разі критичних відмов.

2. Надійне тестування та валідація. Широке тестування в різних змодельованих і реальних умовах допомагає виявити потенційні слабкі місця і підвищити надійність систем управління і датчиків гарантує, що системи працюють так, як очікується.

3. Прогнозоване обслуговування. Використання методів профілактичного обслуговування, таких як моніторинг стану системи та даних про продуктивність, допомагає передбачити потенційні збої до того, як вони відбудуться. Такий проактивний підхід дозволяє проводити своєчасне технічне обслуговування і ремонт, скорочуючи час простою і підвищуючи надійність.

4. Вдосконалені протоколи зв'язку. Розробка надійних протоколів зв'язку забезпечує надійну передачу даних між БпНА і центром управління. Безпечні та надлишкові лінії зв'язку допомагають підтримувати можливості контролю та моніторингу навіть у віддалених районах.

5. Заходи кібербезпеки. Впровадження надійних заходів кібербезпеки захищає системи управління від зловмисних атак. Регулярна оцінка безпеки, шифрування і безпечний контроль доступу є життєво важливими для захисту цілісності безпілотних технологій.

Забезпечення стабільного та ефективного енергопостачання є ключовим фактором для оптимальної роботи та автономності БпНА. Безпілотні підводні апарати стикаються з низкою серйозних викликів у забезпеченні стабільного енергопостачання. Однією з ключових проблем є обмежений термін служби акумуляторів, що обмежує тривалість їх експлуатації та вимагає частого заряджання або заміни батарей. Щільність енергії наявних джерел живлення часто обмежує вантажопідйомність і дальність польоту БпНА, що може стати суттєвою перешкодою для тривалих місій. Додатково, суворі морські умови негативно впливають на продуктивність і тривалість служби систем зберігання енергії, що призводить до зростання витрат на обслуговування та заміну. Ефективна інтеграція цих енергетичних систем з іншими бортовими технологіями є критично важливою для підтримання загальної продуктивності системи та забезпечення надійної роботи.

Розвиток сучасних методів енергоживлення має вирішальне значення для підвищення ефективності та експлуатаційних можливостей БпНА. Використання сонячних панелей пропонує відновлювальне енергетичне рішення, яке може значно подовжити час роботи апаратів, особливо в сонячних регіонах. Досягнення в галузі фотоелектричних технологій підвищили ефективність сонячних панелей, зробивши їх більш життєздатним варіантом для БпНА. Акумулятори, зокрема літій-іонні та літій-полімерні, забезпечують високу щільність енергії та ефективність, хоча їхня ємність та інфраструктура для заряджання залишаються значними викликами. Гібридні системи, що поєднують кілька джерел енергії, наприклад, сонячні панелі з акумуляторами або паливними елементами, можуть підвищити як енергоефективність, так і надійність. Водневі паливні елементи, хоча і мають високу ефективність та тривалий термін служби, стикаються з обмеженнями, пов'язаними зі зберіганням та інфраструктурою, що обмежує їхнє широке впровадження. Для максимізації експлуатаційної ефективності БпНА застосовуються різні технології та системи, спрямовані на зниження енергоспоживання. Вдосконалені системи енергоменеджменту (EMS) відіграють вирішальну роль в оптимізації енергоспоживання, відстежуючи та контролюючи розподіл енергії між різними підсистемами. Технологія рекуперативного гальмування, яка рекуперує енергію під час уповільнення або зупинки, перетворює цю енергію назад у корисну потужність, підвищу-

ючи таким чином загальну ефективність. Використання малопотужної електроніки, такої як датчики і комунікаційні пристрої, допомагає зменшити загальне енергоспоживання БПНА. Крім того, адаптивні алгоритми планування місії оптимізують маршрути і завдання місії для мінімізації витрат енергії, що ще більше подовжує час роботи апаратів.

Розгортання виробництва та експлуатації БПНА піднімає кілька етичних дилем, які необхідно ретельно розглянути, щоб забезпечити відповідальне і прийнятне використання цих технологій, наприклад, питання конфіденційності. Використання безпілотних технологій викликає серйозні занепокоєння щодо конфіденційності адже БПНА, оснащені сучасними системами спостереження і моніторингу, можуть збирати великі обсяги даних про морську діяльність, які можуть містити конфіденційну інформацію про приватні судна і окремих осіб. Забезпечення того, що ці технології не порушують права на недоторканність приватного життя, має вирішальне значення. Це вимагає чітких інструкцій і правил збору, зберігання і використання даних, щоб захистити приватне життя людей і водночас скористатися перевагами, які надають БПНА.

Моніторинг та взаємодія з морською екосистемою за допомогою БПНА піднімає етичні питання, пов'язані з впливом на морське життя. Хоча ці технології можуть надавати цінні дані для збереження природи, існує ризик порушення середовища існування і поведінки морських видів. Етичні міркування вимагають, щоб БПНА працювали таким чином, щоб мінімізувати їхній екологічний слід, гарантуючи, що спостереження і взаємодія з морським життям не завдають шкоди або стресу організмам і середовищу їхнього існування.

Інтеграція безпілотних апаратів у морські операції піднімає правові та етичні питання, пов'язані з участю людини в процесах прийняття рішень. Оскільки ці апарати можуть діяти автономно, визначення ступеня людського втручання і рівня контролю є складним завданням. Правова база повинна передбачати відповідальність, підзвітність і делегування повноважень щодо прийняття рішень, гарантуючи, що використання БПНА відповідає чинному морському законодавству та етичним нормам.

**Результати та обговорення.** Розуміння енергоспоживання безпілотних надводних апаратів (БпНА) у різних режимах роботи є важливим для ефективного управління енергетичними ресурсами та планування місії. Детальні розрахунки енергоспоживання дозволяють проектувати системи, які можуть задовольнити специфічні енергетичні потреби різних місій. Наприклад, у типовому сценарії експлуатації енергоспоживання може бути розраховане на основі таких факторів, як швидкість БпНА, потужність, необхідна для руху, енергія, що використовується бортовими датчиками і системами зв'язку, а також тривалість місії. Аналізуючи ці фактори, можна розробити точні моделі, які прогнозують споживання енергії і потреби в енергопостачанні, що дозволить розробляти більш ефективні і автономні БпНА. Для точного оцінювання енергоспоживання БпНА в різних режимах експлуатації, необхідно враховувати наступні експлуатаційні параметри (таблиця 4)



Таблиця 4

Експлуатаційні параметри для розрахунку енергопостачання БпНА

| Параметр                          | Опис  |
|-----------------------------------|---|
| Режим очікування                  | Енергоспоживання, коли БпНА нерухомий   |
| Крейсерський режим                | Споживання енергії, коли БпНА рухається зі сталою швидкістю   |
| Високошвидкісний режим            | Енергоспоживання, коли БпНА рухається на високій швидкості  |
| Ефективність перетворення енергії | Ефективність системи перетворення енергії (наприклад, акумуляторів, інверторів)                                   |
| Ефективність зберігання енергії   | Ефективність зберігання енергії (наприклад, ефективність заряджання та розряджання акумуляторів)                  |
| Екологічні фактори                | Поправки на умови навколишнього середовища, такі як температура, стан моря та мінливість сонячного випромінювання |

Основні аспекти енергоспоживання та енергетичної ефективності безпілотних надводних апаратів (БпНА) виходять з того що енергетична система БпНА повинна забезпечувати стабільне та ефективне живлення всіх систем і компонентів апарата, що вимагає ретельного розрахунку споживання енергії та оцінки загальної ефективності системи. Визначення енергетичного балансу та ефективності є ключовими елементами для забезпечення тривалості автономної роботи та зниження витрат на технічне обслуговування. Загальне споживання енергії для кожного режиму роботи можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$E_{\text{balance}} = (A_{\text{panel}} \times I_{\text{solar}} \times \eta_{\text{solar}} \times t_{\text{sunlight}}) - \left( \sum_{i=1}^n (\eta_{ci} \times \eta_{si} \times P_{\text{mode}i} \times t_i) \right), \quad (1)$$

де  $E_{\text{balance}}$  – енергетичний баланс;

$A_{\text{panel}}$  – площа сонячних панелей;

$I_{\text{solar}}$  – інтенсивність сонячного випромінювання;

$\eta_{\text{solar}}$  – ефективність сонячних панелей;

$t_{\text{sunlight}}$  – тривалість освітлення сонцем;

$n$  – кількість режимів роботи;

$\eta_i$  – ефективність перетворення енергії для режиму  $i$ ;

$\eta_k$  – ефективність зберігання енергії для режиму  $i$ ;

$P_{\text{mode}i}$  – споживання енергії в режимі  $i$ ;

$t_i$  – тривалість роботи в режимі  $i$ .

### Загальна ефективність системи

$$\eta_{overall} = \frac{A_{panel} \times I_{solar} \times \eta_{solar} \times t_{sunlight}}{\sum_{i=1}^n (\eta_{ci} \times \eta_{si} \times P_{modei} \times t_i)} . \quad (2)$$

де  $\eta_{overall}$  – загальна ефективність системи.

Розрахунок енергетичного балансу дозволяє визначити, чи вистачає енергії, виробленої сонячними панелями, для покриття потреб апарата в енергії для всіх режимів роботи. Позитивне значення енергетичного балансу свідчить про надлишок енергії, який може бути використаний для подальшої роботи апарата або збережений у накопичувачах енергії для майбутніх потреб. Негативне значення, навпаки, вказує на дефіцит енергії, який може призвести до обмеження автономності апарата та необхідності в додаткових джерелах живлення або частішій підзарядці. А загальна ефективність системи є показником того, наскільки ефективно система використовує доступну енергію для забезпечення всіх функцій БпНА. Високе значення загальної ефективності вказує на те, що більша частина енергії, виробленої сонячними панелями, використовується для підтримки роботи апарата, що сприяє підвищенню його автономності та зниженню витрат на технічне обслуговування.

На практиці ці висновки означають, що для забезпечення стабільної та ефективної роботи БпНА необхідно не тільки оптимізувати енергетичні системи, але й постійно контролювати та покращувати їхню ефективність шляхом вдосконалення технологій зберігання та перетворення енергії, використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, а також впровадження сучасних методів управління енергоспоживанням.

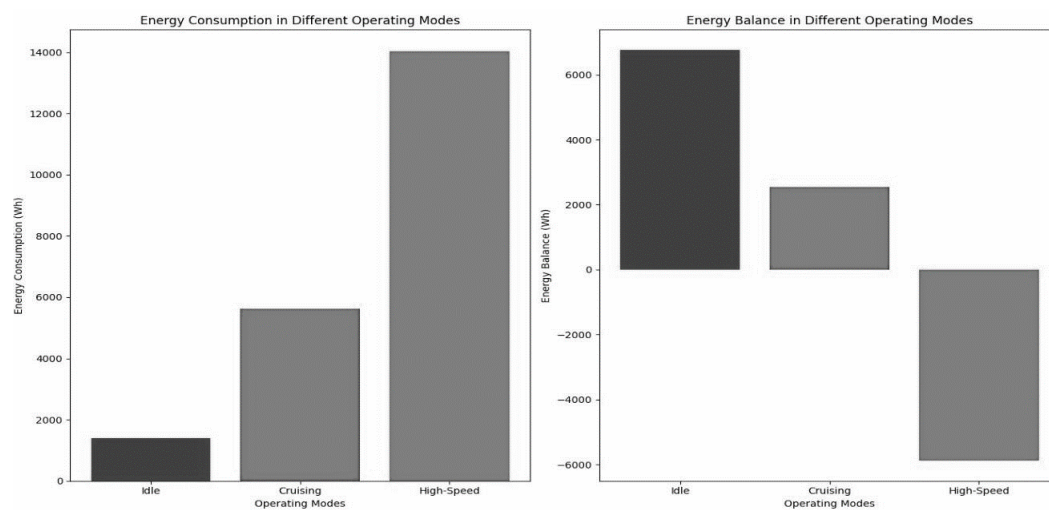
Розрахунки енергоспоживання безпілотного надводного транспортного засобу (БпНА) передбачають визначення енергоспоживання в різних режимах роботи, включаючи режим холостого ходу, крейсерський та швидкісний режими. Враховуючи час роботи та ефективність систем перетворення і зберігання енергії, розраховується загальне енергоспоживання для кожного режиму. Наприклад, режим холостого ходу споживає приблизно 1404,99 Вт-год, крейсерський режим – близько 5619,95 Вт-год, а високошвидкісний режим – близько 14049,88 Вт-год за 24 години. Паралельно розраховується надходження енергії від сонячних панелей, виходячи з ефективності, сонячного випромінювання та площі панелей, в результаті чого загальне надходження становить 8160 Вт-год. Потім виводиться енергетичний баланс шляхом порівняння пропозиції сонячної енергії зі споживанням в кожному режимі, виявляючи надлишок енергії в режимах холостого ходу і крейсерського ходу, але дефіцит у швидкісному режимі. Це підкреслює необхідність ефективного управління енергією і можливої залежності від додаткових джерел енергії для високошвидкісних операцій.

Таблиця 5

*Енергоспоживання та енергозабезпечення БпНА*

| Режим            | Споживана потужність, Вт | Енергоспоживання, Вт-год. | Постачання сонячної енергії, Вт-год. | Енергетичний баланс, Вт-год. |
|------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Бездіяльність    | 50                       | 1404.99                   | 8160                                 | 6755.01                      |
| Крейсерство      | 200                      | 5619.95                   | 8160                                 | 2540.05                      |
| Високошвидкісний | 500                      | 14049.88                  | 8160                                 | -5889.88                     |

Графіки на рис. 1 ілюструють споживання енергії та енергетичний баланс для БпНА в режимах холостого ходу, крейсерського та високошвидкісного руху. Лівий графік показує, що режим холостого ходу має найнижче споживання енергії, крейсерський режим має помірне споживання, а високошвидкісний режим має найвище споживання. Правий графік показує, що режим холостого ходу підтримує позитивний енергетичний баланс, крейсерський режим має зменшений позитивний баланс, а високошвидкісний режим демонструє від'ємний баланс, що свідчить про перевищення споживання енергії над її пропозицією. Ці висновки підкреслюють необхідність ефективного управління енергоспоживанням, особливо у високошвидкісних режимах.



*Рис. 1. Енергоспоживання та енергетичний баланс для БпНА в різних режимах роботи*

Розробка безпілотних систем, таких як БпНА, вимагає значних ресурсів і досвіду. До них відносяться передова технологічна інфраструктура, спеціалізоване програмне забезпечення, високоякісні датчики і надійні комунікаційні мережі.

Експертиза в таких галузях, як робототехніка, штучний інтелект, морська інженерія та аналіз даних, має вирішальне значення для проектування і впровадження ефективних безпілотних систем. Навчання автономних систем включає в себе процеси і методи, що забезпечують їх правильну і ефективну роботу. Сюди входять методи машинного навчання, симуляційні середовища та тестування в реальних умовах. Навчання також є ітеративним і вимагає постійного вдосконалення на основі даних про продуктивність і зворотного зв'язку, щоб підвищити точність і надійність системи. Процес розробки та вдосконалення безпілотних систем все ще стикається з низкою проблем які включають технологічні обмеження, такі як точність датчиків і затримка зв'язку, а також складність інтеграції різних компонентів системи. Крім того, забезпечення надійності та безпеки автономних операцій у мінливому морському середовищі створює проблеми, які постійно вимагають інноваційних рішень та ретельного тестування.

**Висновки.** Проведений аналіз проблем безпеки та ефективності функціонування безпілотних надводних апаратів (БпНА) в морських умовах показав що основні проблеми, пов'язані з безпекою, включають деякі ризики, що може призвести до аварій та пошкоджень. Надійність систем управління та датчиків є критично важливою для забезпечення безпеки, тому їх ретельне тестування та валідація мають велике значення.

Ефективне енергопостачання є ще однією ключовою складовою безпечної та автономної роботи БпНА. Аналіз енергоспоживання в різних режимах роботи дозволяє проектувати системи, здатні задовольнити специфічні потреби місій. Визначення детальних експлуатаційних параметрів та врахування факторів ефективності перетворення і зберігання енергії дозволяє точно оцінити потреби в енергії та розробляти більш ефективні та автономні системи. У статті також було розглянуто сучасні методи енергоживлення, включаючи використання сонячних панелей, літій-іонних та літій-полімерних акумуляторів, а також гібридних систем енергозабезпечення. Незважаючи на певні обмеження, такі як обмежений термін служби акумуляторів та проблеми зі зберіганням водню, ці методи показали значний потенціал для підвищення ефективності та надійності БпНА.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Keil, Semih. (2023). *Development of Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review. International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, 1, 596-600. DOI: 10.59287/icaens.1064.*
2. Katsuras, Georgios, Dimitriou, Elias, Karavoltsos, Sotirios, Samios, Stylianos, Sakellari, Aikaterini, Mentzafo, A., Tsallas, Nikolaos, & Skoulos, Michael. (2024). *Use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in Water Chemistry Research. Sensors, 24, 2809. DOI: 10.3390/s24092809.*
3. Li, Chenmin, Zhao, Xu, Yu, Rongrong, Chen, Yehwa, & Lin, Fei. (2024). *New Robust Control and Optimal Design for Fuzzy Unmanned Surface Vehicles (USVs). International Journal of Fuzzy Systems. DOI: 10.1007/s40815-024-01767-3.*

4. Shimkhanda, Daniel, Yan, Shaolun, & Xiang, Xiangbo. (2024). *Route Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Comprehensive Analysis*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 382. DOI: 10.3390/jmse12030382.
5. Shaaban, S., Abdellatif Hamed Ibrahim, Ahmed, Khaled, Dina, Ali, Gussien, Khaled, Mariam, & Elnaggar, Nurhan. (2021). *Development of a Sustainable Unmanned Surface Vehicle (USV) for Search and Rescue Operations*. *International Undergraduate Research Conference, Cairo, Egypt*. DOI: 10.21608/IUGRC.2021.246530.
6. Tan, Goge, Zhuang, Jiayuan, Zou, Jing, & Wang, Lei. (2022). *Task Allocation for Multiple Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles (USVs) Based on a Self-Organizing Map*. *Applied Ocean Research*, 126, 103262. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103262.
7. Tan, Goge, Zhuang, Jiayuan, Zou, Jing, & Wang, Lei. (2023). *Adaptive Path Planning for a Swarm of Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using the Fast Marching Square Method*. *Ocean Engineering*, 268, 113432. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113432.
8. Ansari, Jamal, O'Donnell, Jacob, Fayza, Nashiyat, & Trace, Brian. (2020). *Swarm of Waterborne Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review from Modeling to Field Implementation*. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. DOI: 10.1115/DETC2020-22702.
9. Boo, Sun. (2004). *Conceptual Design Study of an Unmanned Surface Vehicle (USV) for the Korean Navy*. *Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology*, 7.
10. Katsuras, Georgios, Dimitriou, Elias, Karavoltos, Sotirios, Samios, Stylianos, Sakellari, Aikaterini, Mentzafo, A., Tsallas, Nikolaos, & Skoulos, Michael. (2024). *Water Quality of Watersheds in the Eastern Mediterranean Using Autonomous Unmanned Surface Vehicles (USVs)*. DOI: 10.20944/preprints202402.1125.v1.
11. Luo, Jing, Zhang, Yuhan, Zhuang, Jiayuan, & Su, Yumin. (2024). *Intelligent Task Allocation and Planning for Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using Self-Monitoring and Blocking Deployment Methods*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 179. DOI: 10.3390/jmse12010179.
12. Liu, Wenwen. (2020). *Reliable Multi-Sensor Data Fusion for Practical Navigation of Unmanned Surface Vehicles (USVs)*. *University College London Conference*.
13. Liu, Yiping, Zhang, Jianqiang, Sui, Bowen, & Zhang, Yuanyuan. (2024). *Low-Activity Unmanned Surface Vehicle Formation for Obstacle Avoidance and Assembly: A Perturbed Fluid-Based Solution*. *Measurement and Control*, 57, 992-1003. DOI: 10.1177/00202940241226854.

14. Song, Lifei, Chen, Houjing, Xiong, Wenhao, Zaopeng, Dong, Mao, Puxiu, Xiang, Zuquan, & Hu, Kai. (2019). *Collision Avoidance Method for Unmanned Surface Vehicles (USVs) Based on Motion Capability Database*. *Polish Maritime Research*, 26, 55-67. DOI: 10.2478/pomr-2019-0025.
15. Pleskach, Maria. (2016). *EvoLogics Explores New Applications for its Sonobot USV: An Unmanned Ground Vehicle for LBL Positioning Aid*. *Hydro International*, 20, 22-25.
16. Peng, Zitian, Yue, Yong, Zhu, Xiaohui, Huang, Mengze, Wong, Prudence, Yao, Shanliang, Li, Zhuoxiao, & Hou, Dunkun. (2023). *Application of Digital Twins in Unmanned Surface Vehicles: A Review*. DOI: 10.1109/CSECS60003.2023.1042834.
17. Kazaku, Mihai, Axinte, Tiberiu, & Curcea, Elena. (2024). *The Importance of Unmanned Surface Vehicles: A Perspective*. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research*, 4. DOI: 10.62225/2583049X.2024.4.2.2730.
18. Yang, Xiaofei, She, Hongwei, Lu, Mengmeng, Ye, Hui, Guan, Jun, Li, Jianzheng, Xiang, Zhengrong, & Shen, Hao. (2024). *Joint Ship Detection and Waterway Segmentation Method for Environmentally Safe Unmanned Vehicles on Canal Waterways*. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. DOI: 10.1109/TASE.2024.3375300.
19. Liu, Yuanchang, Song, Rui, Bucknell, Richard, & Zhang, Xinyu. (2019). *Intelligent Multi-Task Allocation and Planning for Multiple Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using Self-Organizing Maps and Fast Marching Method*. *Information Sciences*, 496. DOI: 10.1016/j.ins.2019.05.029.
20. Santos, Mateus, Bartlett, Ben, Schneider, Vincent, Braday, Fiacra, Blank, Benjamin, Santos, Philip, Trslik, Petar, Riordan, James, & Dooley, Gerard. (2024). *Cooperative Unmanned Aerial and Surface Vehicles for Extended Coverage in Marine Environments*. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3353046.
21. Wang, Liqian, Dong, Yakui, Fei, Chen, Liu, Junlian, Fan, Shuzhen, Liu, Yongxia, Yongfu, Li, Liu, Zhao, & Xiang. (2024). *Lightweight SNN for Multisource Infrared Ship Detection from Unmanned Marine Vehicles*. *Heliyon*, 10, e26229. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26229.
22. Xu, Hu, Zhang, Xiaomin, He, Ju, Pan, Changsong, & Yu, Yang. (2024). *ROTracker: A Novel Radar-Based Object Tracking Method for Unmanned Surface Vehicles in Marine Environments*. *Frontiers in Marine Science*, 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1411920.
23. Kang, Zheng, Gao, Miao, Liao, Zihao, & Zhang, Anmin. (2024). *Joint Ocean Observation Research Based on Communication with Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles*. *Frontiers in Marine Science*, 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1388617.
24. Chong, Sang, Kim, Min, Park, He, Kim, Yoon, & Ji, De Hyeong. (2024). *Fault Diagnosis Technology for Efficient Swarm Management of Unmanned Surface Vehicles*. *Applied Sciences*, 14, 4210. DOI: 10.3390/app14104210.

25. Zhang, Zheng, Huang, Bin, Zhou, Bin, & Miao, Jianming. (2024). *Anti-Crowding Interaction Mechanism Based on Leaderless Formation Control for Unmanned Surface Vehicles with Intermittent Communication*. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. DOI: 10.1109/TVT.2024.3423478.
26. Melnyk O., Onyshchenko S., Koskina Y., Aleksandrovska N., Drozhzhyn O., Maluha E., Pulyaev I., Bondaryuk M. (2024). *Full overlap ship security model: an integrative approach to shipboard equipment information security*. *E3S Web of Conferences*, 501, art. no. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202450102002
27. Korban D., Melnyk O., Onishchenko O., Kurdiuk S., Shevchenko V., Obniavko T. (2024). *Radar-based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 122, P. 111 – 127. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.122.7
28. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. (2022). *Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control*. *TransNav*, 16 (3), P. 553-559. DOI: 10.12716/1001.16.03.18

#### REFERENCES

1. Keil, Semih. (2023). *Development of Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review*. *International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 1, 596-600. DOI: 10.59287/icaens.1064.
2. Katsuras, Georgios, Dimitriou, Elias, Karavoltos, Sotirios, Samios, Stylianos, Sakellari, Aikaterini, Mentzafos, A., Tsallas, Nikolaos, & Skoulos, Michael. (2024). *Use of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in Water Chemistry Research*. *Sensors*, 24, 2809. DOI: 10.3390/s24092809.
3. Li, Chenmin, Zhao, Xu, Yu, Rongrong, Chen, Yehwa, & Lin, Fei. (2024). *New Robust Control and Optimal Design for Fuzzy Unmanned Surface Vehicles (USVs)*. *International Journal of Fuzzy Systems*. DOI: 10.1007/s40815-024-01767-3.
4. Shimkhanda, Daniel, Yan, Shaolun, & Xiang, Xiangbo. (2024). *Route Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Comprehensive Analysis*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 382. DOI: 10.3390/jmse12030382.
5. Shaaban, S., Abdellatif Hamed Ibrahim, Ahmed, Khaled, Dina, Ali, Gussien, Khaled, Mariam, & Elnaggar, Nurhan. (2021). *Development of a Sustainable Unmanned Surface Vehicle (USV) for Search and Rescue Operations*. *International Undergraduate Research Conference, Cairo, Egypt*. DOI: 10.21608/IUGRC.2021.246530.

6. Tan, Goge, Zhuang, Jiayuan, Zou, Jing, & Wang, Lei. (2022). *Task Allocation for Multiple Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles (USVs) Based on a Self-Organizing Map*. *Applied Ocean Research*, 126, 103262. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103262.
7. Tan, Goge, Zhuang, Jiayuan, Zou, Jing, & Wang, Lei. (2023). *Adaptive Path Planning for a Swarm of Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using the Fast Marching Square Method*. *Ocean Engineering*, 268, 113432. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113432.
8. Ansari, Jamal, O'Donnell, Jacob, Fayza, Nashiyat, & Trace, Brian. (2020). *Swarm of Waterborne Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review from Modeling to Field Implementation*. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. DOI: 10.1115/DETC2020-22702.
9. Boo, Sun. (2004). *Conceptual Design Study of an Unmanned Surface Vehicle (USV) for the Korean Navy*. *Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology*, 7.
10. Katsuras, Georgios, Dimitriou, Elias, Karavoltsos, Sotirios, Samios, Stylianos, Sakellari, Aikaterini, Mentzafos, A., Tsallas, Nikolaos, & Skoulos, Michael. (2024). *Water Quality of Watersheds in the Eastern Mediterranean Using Autonomous Unmanned Surface Vehicles (USVs)*. DOI: 10.20944/preprints202402.1125.v1.
11. Luo, Jing, Zhang, Yuhan, Zhuang, Jiayuan, & Su, Yumin. (2024). *Intelligent Task Allocation and Planning for Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using Self-Monitoring and Blocking Deployment Methods*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 179. DOI: 10.3390/jmse12010179.
12. Liu, Wenwen. (2020). *Reliable Multi-Sensor Data Fusion for Practical Navigation of Unmanned Surface Vehicles (USVs)*. *University College London Conference*.
13. Liu, Yiping, Zhang, Jianqiang, Sui, Bowen, & Zhang, Yuanyuan. (2024). *Low-Activity Unmanned Surface Vehicle Formation for Obstacle Avoidance and Assembly: A Perturbed Fluid-Based Solution*. *Measurement and Control*, 57, 992-1003. DOI: 10.1177/00202940241226854.
14. Song, Lifei, Chen, Houjing, Xiong, Wenhao, Zaopeng, Dong, Mao, Puxiu, Xiang, Zuquan, & Hu, Kai. (2019). *Collision Avoidance Method for Unmanned Surface Vehicles (USVs) Based on Motion Capability Database*. *Polish Maritime Research*, 26, 55-67. DOI: 10.2478/pomr-2019-0025.
15. Pleskach, Maria. (2016). *EvoLogics Explores New Applications for its Sonobot USV: An Unmanned Ground Vehicle for LBL Positioning Aid*. *Hydro International*, 20, 22-25.
16. Peng, Zitian, Yue, Yong, Zhu, Xiaohui, Huang, Mengze, Wong, Prudence, Yao, Shanliang, Li, Zhuoxiao, & Hou, Dunkun. (2023). *Application of Digital Twins in Unmanned Surface Vehicles: A Review*. DOI: 10.1109/CSECS 60003.2023.1042834.



17. Kazaku, Mihai, Axinte, Tiberiu, & Curcea, Elena. (2024). *The Importance of Unmanned Surface Vehicles: A Perspective*. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research*, 4. DOI: 10.62225/2583049X.2024.4.2.2730.
18. Yang, Xiaofei, She, Hongwei, Lu, Mengmeng, Ye, Hui, Guan, Jun, Li, Jianzheng, Xiang, Zhengrong, & Shen, Hao. (2024). *Joint Ship Detection and Waterway Segmentation Method for Environmentally Safe Unmanned Vehicles on Canal Waterways*. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. DOI: 10.1109/TASE.2024.3375300.
19. Liu, Yuanchang, Song, Rui, Bucknell, Richard, & Zhang, Xinyu. (2019). *Intelligent Multi-Task Allocation and Planning for Multiple Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using Self-Organizing Maps and Fast Marching Method*. *Information Sciences*, 496. DOI: 10.1016/j.ins.2019.05.029.
20. Santos, Mateus, Bartlett, Ben, Schneider, Vincent, Braday, Fiacra, Blank, Benjamin, Santos, Philip, Trslik, Petar, Riordan, James, & Dooley, Gerard. (2024). *Cooperative Unmanned Aerial and Surface Vehicles for Extended Coverage in Marine Environments*. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3353046.
21. Wang, Liqian, Dong, Yakui, Fei, Chen, Liu, Junlian, Fan, Shuzhen, Liu, Yongxia, Yongfu, Li, Liu, Zhao, & Xiang. (2024). *Lightweight SNN for Multisource Infrared Ship Detection from Unmanned Marine Vehicles*. *Heliyon*, 10, e26229. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26229.
22. Xu, Hu, Zhang, Xiaomin, He, Ju, Pan, Changsong, & Yu, Yang. (2024). *ROTracker: A Novel Radar-Based Object Tracking Method for Unmanned Surface Vehicles in Marine Environments*. *Frontiers in Marine Science*, 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1411920.
23. Kang, Zheng, Gao, Miao, Liao, Zihao, & Zhang, Anmin. (2024). *Joint Ocean Observation Research Based on Communication with Heterogeneous Unmanned Surface Vehicles*. *Frontiers in Marine Science*, 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1388617.
24. Chong, Sang, Kim, Min, Park, He, Kim, Yoon, & Ji, De Hyeong. (2024). *Fault Diagnosis Technology for Efficient Swarm Management of Unmanned Surface Vehicles*. *Applied Sciences*, 14, 4210. DOI: 10.3390/app14104210.
25. Zhang, Zheng, Huang, Bin, Zhou, Bin, & Miao, Jianming. (2024). *Anti-Crowding Interaction Mechanism Based on Leaderless Formation Control for Unmanned Surface Vehicles with Intermittent Communication*. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*. DOI: 10.1109/TVT.2024.3423478.
26. Melnyk O., Onyshchenko S., Koskina Y., Aleksandrovska N., Drozhzhyn O., Maluha E., Pulyaev I., Bondaryuk M. (2024). *Full overlap ship security model: an integrative approach to shipboard equipment information security*. *E3S Web of Conferences*, 501, art. no. 02002. DOI: 10.1051/e3sconf/202450102002

27. Korban D., Melnyk O., Onishchenko O., Kurdiuk S., Shevchenko V., Obniavko T. (2024). Radar-based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 122, pp. 111 – 127. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.122.7
28. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. (2022). Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. *TransNav*, 16 (3), pp. 553-559. DOI: 10.12716/1001.16.03.18

*Стаття надійшла до редакції 24.04.2024*

**Посилання на статтю: Бурлаченко Д.А., Пастернак О.Я., Пуляєв І.О., Заяц С.В., Чеча О.П., Щенявський Г.С.** Аспекти підвищення надійності експлуатації безпілотних надводних апаратів // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2024. № 2 (73). С. 184-201. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-184-201.

*Article received 24.04.2024*

**Reference a journal artic: Burlachenko D., Pasternak O., Pulyaev I., Zayats S., Checha O., Scheniavskyi G.** Aspects of improving the reliability of unmanned surface vehicles // *Herald of the Odessa national maritime university: Coll. scient. works*, 2024. № 2 (73). P. 184-201. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-184-201.