

УДК 656.6:629.067

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МОРСЬКИХ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ У ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Доктори техн. наук О. М. Мельник, О. А. Онищенко, д-р філос. С. В. Курдюк,
молод. наук. співроб. Т. К. Гаврилюк, старш. викл. Д. А. Бурлаченко

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND PROSPECTS OF APPLICATION OF UNMANNED MARITIME VEHICLES IN LOGISTICS SYSTEMS

Sc. D. (Eng) O. M. Melnyk, O. A. Onyshchenko, Ph.D. S. V. Kurdiuk,
Jun. Res. T. K. Havryliuk, Sen. Lecturer D. A. Burlachenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320844>



Анотація. Безпілотні технології відіграють ключову роль в забезпеченні, доставленні вантажів і моніторингу морського середовища, однак їх широке впровадження стикається зі значними викликами, зокрема нестабільністю енергетичного забезпечення, обмеженою автономністю і складністю маршрутизації. У статті розглянуто ключові аспекти використання морських безпілотних апаратів (МБПА) у логістичних системах, включаючи їхні переваги, виклики та перспективи розвитку. Основну увагу приділено потенціалу морських дронів у різних сферах: доставленні вантажів, моніторингу інфраструктури, екологічному контролю та участі в рятувальних операціях. Важливим аспектом роботи є запропонована спрощена математична модель оптимізації маршрутів, що дає змогу мінімізувати витрати на доставлення та підвищити ефективність логістичних систем. Проаналізовано сучасні технології, пов'язані з автономністю дронів, їхньою інтеграцією з інтелектуальними системами, а також роль у розумних логістичних мережах. Значну увагу приділено питанням енергоефективності та впливу МБПА на зменшення екологічного сліду. Висвітлено також виклики впровадження дронів, зокрема відсутність міжнародних регламентів, вимоги до кібербезпеки та обмеження щодо технічних можливостей. На основі аналізу практик успішного використання в судноплавних підкреслено ефективність дронів у скороченні витрат і підвищенні точності операцій. Запропоновано подальші перспективи вдосконалення автономності безпілотних апаратів, розроблення мережеских рішень для групового управління та інтеграції з портовою інфраструктурою. Результати дослідження підкреслюють необхідність встановлення міжнародних стандартів і нормативів для забезпечення та екологічності, а також розвиток енергоефективних рішень для створення фундаменту глибокої інтеграції МБПА у глобальні логістичні системи.

Ключові слова: безпілотні апарати, логістичні системи, оптимізація маршрутів, енергоефективність, автономні системи, морські дрони, морський транспорт, інтелектуальні системи, екологічний контроль, рятувальні операції, моніторинг інфраструктури, морські перевезення.

Abstract. Unmanned technologies play a key role in ensuring security, cargo delivery and monitoring of the marine environment, but their widespread adoption faces significant challenges, including unstable power supply, limited autonomy and complexity of routing. The article discusses the key aspects of the use of marine unmanned aerial vehicles (MAVs) in logistics systems, including their advantages, challenges, and development prospects. The focus is on the potential of maritime drones in various areas: cargo delivery, infrastructure monitoring, environmental control, and

participation in rescue operations. An important aspect of the work is the proposed simplified mathematical model of route optimization, which minimizes delivery costs and increases the efficiency of logistics systems. Modern technologies related to the autonomy of drones, their integration with intelligent systems, and their role in smart logistics networks are analyzed. Considerable attention is paid to energy efficiency and the impact of UAS on reducing the ecological footprint. The challenges of introducing drones, including the lack of international regulations, cybersecurity requirements, and technical limitations, are also highlighted. Based on the analysis of successful practices in the shipping industry, the effectiveness of drones in reducing costs and increasing the accuracy of operations is emphasized. Further prospects for improving the autonomy of unmanned vehicles, developing network solutions for group management and integration with port infrastructure are proposed. The results of the study emphasize the need to establish international standards and regulations to ensure safety and environmental friendliness, as well as the development of energy-efficient solutions to create the foundation for deep integration of UAS into global logistics systems.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, logistics systems, route optimization, energy efficiency, autonomous systems, maritime drones, maritime transport, intelligent systems, environmental control, rescue operations, infrastructure monitoring, maritime transportation.*

Вступ. Безпілотні технології стали невід'ємною складовою сучасної логістики, надаючи рішення для оптимізації транспортування, моніторингу та управління запасами. Незважаючи на те, що з моменту своєї появи безпілотні апарати (БПА) використовували переважно у військових цілях, в останні роки вони знайшли також застосування і в комерційному та цивільному секторах. Сьогодні повітряні, наземні та морські дрони активно впроваджують для автоматизації доставлення, інвентаризації та контролю інфраструктури, відкриваючи нові горизонти для підвищення ефективності ланцюжків поставок.

Що стосується морських дронів, то вони займають особливе місце в цій еволюції. На відміну від повітряних і наземних безпілотних апаратів, вони призначені для роботи в унікальних умовах – на поверхні води або під водою. Їх застосування дає змогу вирішити широкий спектр завдань, включно з доставленням вантажів між портами, моніторингом морської інфраструктури, екологічним контролем і участю в рятувальних операціях. Морські дрони вже сьогодні дають логістичним компаніям змогу розширити зону дії, знизити витрати на

транспортування і підвищити безпеку операцій, мінімізуючи при цьому втручання людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підкреслюють різноманіття застосування безпілотників у логістиці як із повітряними, так і морськими дронами. Деякі дослідження демонструють, що безпілотні апарати стали важливою складовою операцій «останньої милі», даючи змогу значно скоротити час доставлення і поліпшити доступність товарів у важкодоступних районах. У зв'язку з цим системи управління безпілотними апаратами вже активно впроваджують у логістичних ланцюжках провідних компаній [1, 4, 7]. У морській логістиці безпілотники застосовують для моніторингу за суднами, портами і об'єктами морської інфраструктури. Вони відіграють головну роль у забезпеченні екологічного контролю та запобіганні забрудненню, а також беруть участь у рятувальних операціях. Наприклад, використання дронів для інспекції морських об'єктів і моніторингу викидів значно покращує їхню безпеку і знижує експлуатаційні витрати [6, 8, 11].

Безекіпажні технології активно інтегрують у розумні логістичні рішення,

такі як автономні порти і системи цифрового моніторингу. Дрони сприяють підвищенню оперативної готовності морських і наземних систем завдяки їхній здатності надавати дані в режимі реального часу [3, 9]. Однак упровадження цих технологій пов'язане з низкою викликів: регулюванням, кібербезпекою та розвитком інфраструктури [2, 12].

Ефективність безпілотних апаратів у логістиці зростає завдяки розробленню алгоритмів маршрутизації та поліпшенню автономних систем управління. Ці інновації підтримані дослідженнями в галузі сталого транспорту, де дрони допомагають знизити вуглецевий слід і поліпшити екологічну безпеку операцій [5, 10]. У роботах [13-15] висвітлено розвиток дистанційних комп'ютерних технологій і систем управління автономними суднами, зокрема розроблення математичних моделей для забезпечення їхньої безпечної навігації, проаналізовано методи виявлення автономних об'єктів на водній поверхні.

Незважаючи на те, що безпілотні технології стали невід'ємною складовою логістичних і транспортних систем, їхнє масове впровадження стикається з низкою значних проблем. З одного боку, морські дрони мають величезний потенціал для оптимізації доставлення вантажів, моніторингу інфраструктури та екологічного контролю, з іншого – існує безліч бар'єрів, як-от відсутність чітких міжнародних регламентів, обмежені технічні можливості (вантажопідйомність, автономність), високі вимоги до кібербезпеки та складнощі інтеграції в наявні логістичні ланцюжки. Ці виклики обмежують ефективність і масштабованість застосування морських дронів у логістиці, що потребує подальшого аналізу та опрацювання.

Мета та завдання дослідження. Мета статті – аналіз можливостей і перспектив застосування морських дронів у логістиці, виявлення головних переваг і обмежень, а також визначення шляхів їхнього

ефективного інтегрування в наявні логістичні системи. Завдання – дослідити сучасні напрями застосування морських дронів, розробити спрощену математичну модель оптимізації маршрутів, що дає змогу мінімізувати витрати на доставлення та скоротити час перевезення; проаналізувати сучасні технологічні рішення для підвищення автономності та енергоефективності морських дронів; визначити виклики, пов'язані з використанням морських дронів, включаючи регуляторні, технічні та екологічні аспекти.

Основна частина дослідження. Морські безпілотні апарати (МБПА) завдяки своїм технічним характеристикам і автономності застосовуються в деяких напрямках логістики, оптимізуючи процеси доставлення, моніторингу та управління інфраструктурою.

Один із найперспективніших напрямів – доставлення вантажів, особливо на «останній милі», що стосується транспортування невеликих партій вантажів на фінальному етапі маршруту до кінцевого споживача, що особливо важливо для важкодоступних районів, островів або офшорних платформ. Це дає змогу значно скоротити час і витрати, пов'язані з традиційними методами доставлення, як-от використання сервісних суден або вертольотів. Наприклад, в екстрених випадках саме морські дрони можуть у стислий термін доставити медичні препарати або запчастини, які потребують оперативного доставлення.

МБПА також відіграють головну роль в інспекції об'єктів морської інфраструктури: причалів, портів, судноплавних каналів і офшорних платформ. Завдяки сенсорам із високою роздільною здатністю і можливістю працювати в складних погодних умовах дрони можуть надавати дані про стан об'єктів у режимі реального часу, що допомагає скоротити витрати на технічне обслуговування, своєчасно виявляти пошкодження і запобігати аварійним ситуаціям.

МБПА використовують для моніторингу якості води та виявлення забруднень, збираючи дані про рівень токсичності, температуру та інші параметри, допомагаючи запобігати екологічним катастрофам, наприклад моніторинг розливів і вистежування витоків нафти або хімікатів, мінімізуючи шкоду для екосистеми.

У надзвичайних ситуаціях морські дрони забезпечують більш швидке

реагування шляхом доставлення рятувальних засобів або забезпечення зв'язку з постраждалими до моменту прибуття основної команди рятувальників. Завдяки їхній маневреності та стійкості до складних умов дрони особливо корисні під час роботи в штормових умовах або зонах, не доступних для конвенційних суден (табл. 1).

Таблиця 1

Напрями використання МБПА в логістиці

Напрямок використання	Опис	Переваги
Доставлення вантажів	Перевезення невеликих партій вантажів між портами, островами або офшорними платформами для скорочення часу доставлення	Зменшення витрат і оперативне доставлення до важкодоступних районів
Моніторинг інфраструктури	Інспекція портів, причалів, судноплавних шляхів, каналів та інших об'єктів для оцінювання їхнього стану	Своєчасне виявлення пошкоджень і зменшення витрат на обслуговування
Екологічний контроль	Моніторинг якості води, виявлення забруднень, таких як виток нафти або хімікатів	Захист екосистем і запобігання екологічним катастрофам
Рятувальні операції	Швидке реагування в надзвичайних ситуаціях: доставлення рятувальних засобів і підтримка зв'язку з постраждалими	Оперативна допомога у важкодоступних умовах, підвищення ефективності рятувальних робіт

Морські дрони продемонстрували значний потенціал в оптимізації логістичних і дослідницьких процесів. Нижче розглянуто успішні кейси компаній, інноваційні проекти і їхнє наукове обґрунтування, що показують, як морські дрони змінюють традиційні підходи до логістики та морських операцій.

Наприклад, компанія Rolls-Royce розробляє автономні надводні судна, які мінімізують витрати на екіпаж і знижують екологічний вплив завдяки використанню енергозберігаючих технологій. Наукові дослідження компанії підтверджують, що використання безпілотних суден на 40 % знижує експлуатаційні витрати [1]. Автономні дрони Rolls-Royce застосовують

для транспортування вантажів між портами і моніторингу судноплавних маршрутів, що демонструє високу точність і надійність.

Компанія XOcean використовує безпілотні системи для моніторингу морського середовища та інфраструктури. Ці апарати оснащені сенсорами з високою роздільною здатністю і здатні виконувати тривалі місії зі збору даних про стан води та підводних об'єктів. Наукові публікації свідчать, що дрони XOcean скорочують час на обстеження підводної інфраструктури на 50 % порівняно з традиційними методами [2].

Розробки ASV Global включають автономні системи для обстеження портів, офшорних платформ і підводних

трубопроводів. Дослідження показують, що автономні апарати компанії дають змогу виконувати складні завдання з мінімальною участю людини, що особливо важливо в умовах складного рельєфу або високого рівня небезпеки [3]. Такі технології знаходять застосування в нафтогазовій промисловості та портовій логістиці.

МБПА відіграють також ключову роль у розумних портах, забезпечуючи автоматизацію процесів розвантаження, моніторингу і транспортування вантажів. Деякі наукові дослідження показують, що автоматизація портової інфраструктури з використанням дронів підвищує продуктивність на 30 % і знижує вуглецеві викиди на 20 % [4].

Морські дрони, оснащені системами дистанційного зондування, застосовують для спостереження за льодовими умовами і визначення оптимальних маршрутів для суден. За дослідженнями, проведеними в рамках міжнародних програм, використання дронів в Арктиці дало змогу поліпшити точність картографування льодових маршрутів на 25 % [5].

В екологічних ініціативах морські дрони використовують для відстеження забруднень, таких як розливи нафти, і запобігання їхньому поширенню. Дослідження показують, що дрони можуть виявляти розливи нафти з точністю до 90 % на ранніх стадіях, що дає змогу знизити шкоду для екосистем [6].

Результати та обговорення. Для планування логістичних операцій із використанням дронів основним етапом є

оптимізація маршруту, що мінімізує загальну відстань між складом і клієнтами. Це дає змогу знизити витрати на енергію, зменшити час доставлення та підвищити ефективність логістичної мережі.

Припустимо, що існує кількість N точок включно з центральним складом (початкова і кінцева точка маршруту) і $N - 1$ клієнтів.

Матриця відстаней: відомі відстані між усіма точками на маршруті c_{ij} , де c_{ij} – відстань між пунктами i і j .

Обмеження: кожного клієнта слід відвідати рівно один раз. Маршрут має починатися і закінчуватися на складі. Дрон має вибрати мінімальний маршрут для відвідування всіх точок.

Метою є мінімізація загальної довжини маршруту $\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij}$, де x_{ij} –

бінарна змінна: 1, якщо маршрут проходить із точки i в j , і 0, якщо інакше.

Для розв'язання задачі використовують матрицю відстаней (морські милі) між складом і чотирма клієнтами, що визначає оптимальні маршрути доставлення.

Дані, подані в табл. 2, отримані шляхом математичного моделювання з використанням алгоритмів оптимізації маршрутів для БПМА. В основі моделювання лежать реальні відстані між складом і клієнтами, розраховані на основі картографічних даних, параметрів водних маршрутів і стандартних навігаційних умов у регіоні.

Таблиця 2

Матриця відстаней між складом і клієнтами

	Склад	Клієнт 1	Клієнт 2	Клієнт 3	Клієнт 4
Склад	0	10	15	20	25
Клієнт 1	10	0	35	25	30
Клієнт 2	15	35	0	30	20
Клієнт 3	20	25	30	0	15
Клієнт 4	25	30	20	15	0

Розв'яжемо задачу комівояжера, де змінні x_{ij} визначають, чи включено шлях із i в j до маршруту. Обмеження усувають

підцикли, щоб маршрут охоплював усі точки рівно один раз.

Цільова функція

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

за таких обмежень:

1) кожна точка є початковою і кінцевою одного маршруту:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \quad \forall i, j \quad ; \quad (2)$$

2) усунення підциклів (метод Міллера-Таккера-Земліна):

$$u[i] - u[j] + N \cdot x[i, j] \leq N - 1, \quad \forall i, j, i \neq j \quad , \quad (3)$$

де $u[i]$ – допоміжна змінна, що являє собою порядок відвідування точки i ;
 N – загальна кількість точок.

Виконаємо розрахунок оптимального маршруту, мінімізуючи загальну відстань між складом і клієнтами. Для розв'язання задачі використовуватимемо метод математичного програмування з усуненням підциклів, відомий як метод Міллера-Таккера-Земліна.

Результатом розрахунків є оптимальний маршрут із мінімальними витратами (рис. 1), на якому показано склад і мережу клієнтів у вигляді вузлів, а відстані між ними позначено ребрами, що показують можливі маршрути із зазначенням відстаней між точками.

Схема маршрутів доставлення між центральним складом і клієнтами відображує особливості логістичної мережі, де кожен вузол графа відповідає певному пункту, а стрілки між вузлами позначають можливі шляхи доставлення. Над стрілками вказані відстані (у морських милях), які відображують логістичні витрати у вигляді подоланих відстаней між пунктами. Центральний склад виконує роль початкової та завершальної точки маршруту.

Такий підхід дає змогу планувати доставлення в такий спосіб, щоб дрон завжди повертався на базу після виконання своїх завдань. Клієнти 1, 2, 3 і 4 – точки доставлення, які дрон має обслуговувати. Кожен клієнт має прямий зв'язок зі складом та іншими клієнтами, що забезпечує можливість різних варіантів побудови маршрутів. Відстані між пунктами є важливим показником для оптимізації маршруту. Наприклад, відстань між складом і Клієнтом 1 становить 10 миль, тоді як відстань до Клієнта 4 — 25 миль. Найменша відстань між клієнтами — 15 миль, що спостерігається між Клієнтом 3 і Клієнтом 4. Таку інформацію використовують для скорочення загальної довжини маршруту. Зв'язок між пунктами подано у вигляді повного графа, де кожен клієнт зв'язаний не лише зі складом, а й з іншими клієнтами. Така структура дає змогу вибрати найбільш оптимальний маршрут серед усіх можливих варіантів.

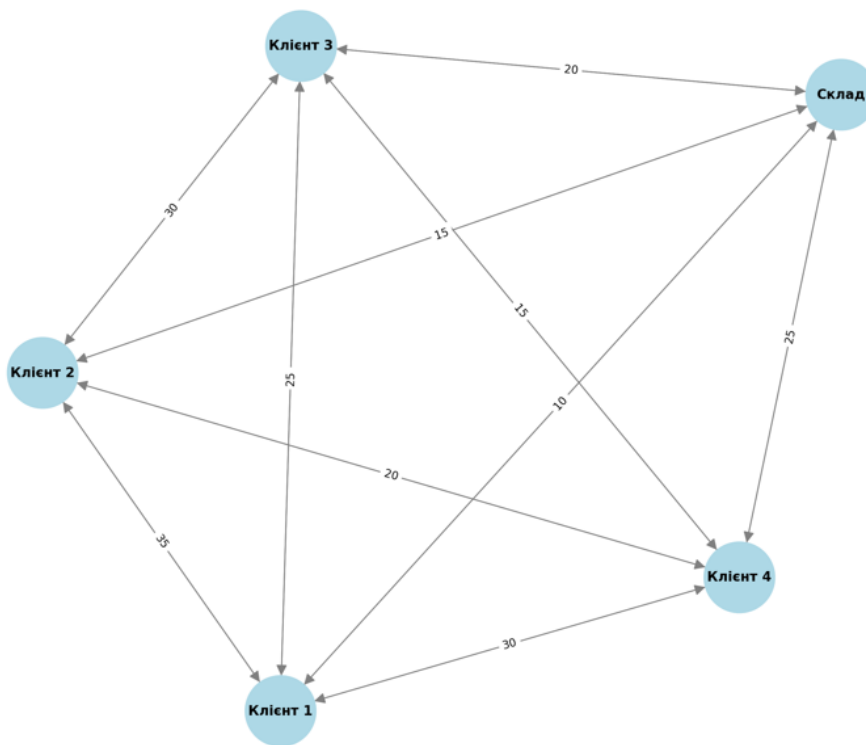


Рис. 1. Схема маршрутів доставлення між складом і клієнтами

Таку схему можна використовувати для аналізу можливих маршрутів і вибору оптимального шляху для доставлення. Вона дає змогу мінімізувати загальну відстань маршруту, що важливо для економії енергії дронів, скоротити час доставлення, особливо в умовах термінових логістичних завдань, і визначити ефективність маршрутів залежно від поставлених завдань, наприклад забезпечення швидкого доставлення, обслуговування

найвіддаленіших клієнтів або максимальна економія ресурсів.

Ступені ефективності маршрутів (табл. 3) розраховані за допомогою математичних оптимізаційних моделей, які враховують такі параметри: загальна відстань маршруту, споживання енергії дроном і час доставлення. Кожен тип маршруту оцінено щодо енергетичних і часових витрат, а також його відповідності логістичним цілям, таким як швидкість доставлення або економія ресурсів.

Таблиця 3

Використання маршрутів дронів у логістиці

Тип маршруту	Ефективність, %	Опис
Оптимальний маршрут	95	Максимальна ефективність завдяки мінімізації відстані та витрат
Довший маршрут	80	Знижена ефективність через додаткові витрати часу і палива
Короткий маршрут	90	Забезпечує значну економію ресурсів, але менш ефективний, ніж оптимальний
Маршрут із випадковим вибором	60	Найнижча ефективність через нерегулярне планування та зайві витрати

На рис. 2 зображено ефективність різних типів маршрутів, використовуваних для логістики дронів:

- оптимальний маршрут (95 %) забезпечує найвищу ефективність: завдяки ретельному плануванню маршруту мінімізовано витрати на паливо та час доставлення, що особливо важливо для дронів з обмеженим запасом енергії;

- для довшого маршруту (80 %) характерні додаткові витрати через збільшену тривалість доставлення. Такий тип можна використовувати у випадках, коли потрібно охопити значну кількість точок без особливої уваги до оптимізації;

- короткий маршрут (90 %) забезпечує добрий компроміс між економією ресурсів і оперативністю, але не враховує глобальної оптимізації;

- маршрут із випадковим вибором (60 %) має найнижчу ефективність через відсутність системного підходу до планування. Це призводить до перевитрат ресурсів і значного збільшення витрат на логістику.

Дані, подані на рис. 2, є візуалізацією ефективності різних маршрутів у відсотковому співвідношенні. Результати були отримані шляхом аналізу змодельованих логістичних операцій для різних умов доставлення.

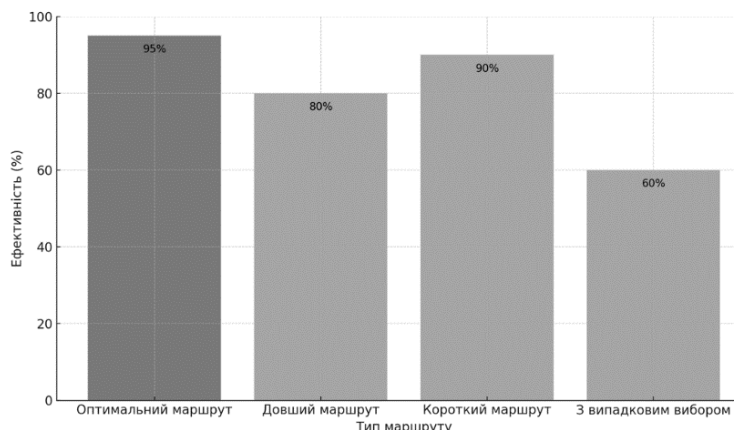


Рис. 2. Ступінь ефективності різних типів маршрутів

Проведений аналіз підкреслює важливість вибору оптимального алгоритму для оптимізації маршрутів дронів у логістиці, завдяки чому можна досягти максимального результату, скорочуючи витрати та підвищуючи швидкість доставлення, що у свою чергу є головним фактором успішної логістики «останньої милі».

МБПА продовжують еволюціонувати, стаючи важливим інструментом для оптимізації логістичних процесів, адже інтеграція морських дронів із системами штучного інтелекту (ШІ) та автоматизованими логістичними

платформами відкриє нові горизонти для їх використання, що дасть змогу (табл. 4):

- автоматично аналізувати маршрути й адаптувати їх у режимі реального часу залежно від погодних умов, завантаженості портів і потреб клієнтів;

- використовувати технології комп'ютерного моніторингу, датчики для спостереження за станом вантажів і об'єктами морської інфраструктури;

- створювати повністю автономні мережі морських дронів, які самостійно координуватимуть доставлення та обмін даними.

Переваги використання МБПА

Переваги	Опис
Автономність і стійкість до погодних умов	Морські дрони здатні працювати автономно без втручання людини та ефективно виконувати завдання у складних погодних умовах, таких як шторми, сильний вітер чи опади
Зменшення операційних витрат	Використання дронів значно зменшує витрати на персонал, паливо і технічне обслуговування порівняно з традиційними суднами
Екологічність і безпека	Морські дрони працюють на електроенергії або альтернативних джерелах енергії, що робить їх екологічно чистими та мінімізує ризики для екіпажу в небезпечних умовах

Зі збільшенням популярності МБПА дедалі гостріше відчувається необхідність уніфікації міжнародних правил їх використання. Без чітко встановлених стандартів зростає ризик зіткнень з іншими суднами, що робить важливим забезпечення безпеки навігації. Також потрібно більше уваги приділяти екологічним аспектам, щоб мінімізувати шкоду морським екосистемам, наприклад, через використання екологічно чистих технологій. Крім того, необхідно створити юридичну базу, яка регулює перетин територіальних вод, захист даних і забезпечення конфіденційності, що дасть змогу ефективно управляти використанням дронів у глобальних логістичних мережах.

Морські безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають значний потенціал для зменшення впливу на навколишнє середовище. Використовуючи електродвигуни або альтернативні джерела енергії, такі як сонячні батареї, вони допомагають зменшити викиди парникових газів і шумове забруднення. Екологічна ефективність АБПА також проявляється в можливості точного моніторингу викидів і збору даних про стан водних екосистем, щоб швидко реагувати на загрози забруднення.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку МБПА, залишаються напрями, які потребують подальших досліджень і вдосконалення. Одним із головних завдань є підвищення енергоефективності, що дасть змогу збільшити дальність рейсів і знизити

споживання ресурсів, особливо під час використання поновлюваних джерел енергії. Також необхідні більш досконалі мережеві рішення для створення систем, здатних координувати роботу груп дронів у складних завданнях, як-от моніторинг, розвідка або рятувальні операції. Важливим напрямом залишається інтеграція морських дронів у глобальні логістичні мережі, що передбачає розроблення алгоритмів, які забезпечують ефективну взаємодію з портовою інфраструктурою і традиційним морським транспортом, що сприяє створенню єдиної і вискоелективної морської транспортної системи.

Майбутнє МБПА пов'язане з їхньою глибокою інтеграцією в розумні логістичні системи, що створить можливості для повністю автономного доставлення вантажів. Однак для успішного впровадження технологій необхідний розвиток міжнародних стандартів і нормативів, а також проведення досліджень у сфері енергоефективності та мережевих рішень. Інвестування в ці напрями стане головним фактором для подальшого зростання та інноваційного розвитку логістики з використанням морських дронів.

Висновки. У статті детально проаналізовано використання морських дронів у логістиці, зокрема їхню роль в оптимізації поставок, моніторингу інфраструктури та проведенні рятувальних операцій. На основі математичних моделей

були розраховані оптимальні маршрути безпілотних апаратів, що дає змогу мінімізувати витрати на доставлення та підвищити ефективність логістичних процесів. Досліджено аспекти планування маршрутів і переваги впровадження таких технологій.

Дослідження показують, що інтеграція МБПА в логістичні мережі може скоротити споживання вичерпаного палива на 30 %, особливо під час операцій із доставлення «останньої милі». Такі екологічні переваги роблять їх важливим інструментом у

досягненні цілей сталого розвитку морського транспорту.

Висвітлено перспективи розвитку морських дронів, включаючи їхню інтеграцію з інтелектуальними системами, використання нових джерел енергії та впровадження мережових рішень для групового управління. Виділено важливість встановлення міжнародних стандартів і нормативно-правової бази, які забезпечать безпеку, екологічну відповідальність і ефективність безпілотних технологій.

Список використаних джерел

1. Jahani H., Khosravi Y., Kargar B., Ong K. L., & Arisian S. (2024). Exploring the role of drones and UAVs in logistics and supply chain management: A novel text-based literature review. *Journal of Cleaner Production*, 413(3), 134893. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.134893>.
2. Frederiksen M. H., & Knudsen M. P. (2018). Drones for offshore and maritime missions: Opportunities and barriers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96(1), 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104259>.
3. Ichimura Y., Dalaklis D., Kitada M., & Christodoulou A. (2022). Shipping in the era of digitalization: Mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors. *Digital Business*, 4(2), 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100023>.
4. Di Paolo L. (2018). Applications of drones in logistics: A literature review. *Logistics and Supply Chain Review*, 22(4), 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.lscr.2018.11.001>.
5. Fanariotis A., Karachalios T., Moschos P., & Giannopoulos G. (2023). Evaluation of contemporary UAV-based measurement techniques for gas emissions monitoring. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 14(3), 23–45. <https://doi.org/10.1145/3635059.3635100>.
6. Wang J., Li H., Yang Z., Zhou K., & Xing W. (2023). Applications, evolutions, and challenges of drones in maritime transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), Article 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>.
7. Benarbia T., & Kyamakya K. (2021). A literature review of drone-based package delivery logistics systems and their implementation feasibility. *Sustainability*, 14(1), Article 360. <https://doi.org/10.3390/su14010360>.
8. Forti N., d'Afflisio E., Braca P., & Millefiori L. M. (2022). Next-gen intelligent situational awareness systems for maritime surveillance and autonomous navigation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 2947–2956. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3158462>.
9. Askarzadeh T., Bridgelall R., & Tolliver D. (2024). Monitoring nodal transportation assets with uncrewed aerial vehicles: A comprehensive review. *Drones*, 8(6), Article 233. <https://doi.org/10.3390/drones8060233>.
10. Song B. D., Park K., & Kim J. (2018). Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 119(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.002>.

11. Argüello G. (2023). Smart port state enforcement through UAVs: New horizons for the prevention of ship source marine pollution. *In Smart Ports and Robotic Systems (pp. 294–309)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25296-9_11.
 12. Thompson M., & Davies M. (2021). Maritime uses of drones. *In Drone Law and Policy (pp. 123–135)*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9781003028031-7>.
 13. Melnyk O., Volianska Ya., Onishchenko O., Onyshchenko S., Kononova O., Vasalatii N. (2022). Development of Computer-based Remote Technologies and Course Control Systems for Autonomous Surface Ships. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 22 (09), 183-188. DOI:<https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.9.27>.
 14. 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, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 16, No. 3. P. 553-559. doi:10.12716/1001.16.03.18.
 15. Stetsenko M., Melnyk O., Vorokhobin I., Korban D., Onishchenko O., Ternovsky V., & Ivanova I. (2024). Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety. *System Research and Information Technologies*, 2024(2), 35–51. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.03>.
-

Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Онищенко Олег Анатольович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління судном, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Курдюк Сергій Вікторович, доктор філософії, старший науковий співробітник, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0000-0002-3165-4571.

Гаврилюк Тимофій Костянтинович, молодший науковий співробітник, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0009-0006-8732-8958.

Бурлаченко Деметрій Анатольович, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0003-3749-4908.

Melnyk Oleksiy, Sc.D., Assoc. Prof., Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Onishchenko Oleg, Sc.D., Professor, Professor of the Department of Ship Handling, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Kurdiuk Serhii, PhD, Senior Researcher, National University «Odesa Maritime Academy». Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0002-3165-4571.

Gavrylyuk Tymofiy, Junior Researcher, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0006-8732-8958.

Burlachenko Dementiy, Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-3749-4908.

Статтю прийнято 01.12.2024 р.