Корякін Костянтин Сергійович, доктор філософії, Одеський національний морський університет, Кафедра судноводіння та морської безпеки, співавтор, Одеса, Україна, https//orcid.org/0000-0003-2388-645X

Дехта Вадим Юрійович, аспірант, Одеський національний морський університет, Кафедра судноводіння та морської безпеки, співавтор, Одеса, Україна, https//orcid.org/0000-0002-0488-5972

Добровольська Ліана Олегівна, асистент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, https//orcid.org/0009-0000-1330-4087

Koryakin Konstantin Serhiyovych, Doctor of Philosophy, Odessa National Maritime University, Department of Navigation and Maritime Safety, co-author, Odesa, Ukraine, https//orcid.org/0000-0003-2388-645X

Dekhta Vadim Yuriyovich, graduate student, Odessa National Maritime University, Department of Navigation and Maritime Safety, co-author, Odessa, Ukraine, https//orcid.org/0000-0002-0488-5972

Dobrovolska Liana Olegivna, assistant professor of the Department of Ship Navigation and Marine Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, https://orcid.org/0009-0000-1330-4087

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІНСПЕКЦІЇ СТРУКТУРНОЇ ЦІЛІСНОСТІ СУДЕН У ПІДВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

MODERN TECHNOLOGIES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF REMOTE INSPECTION OF THE STRUCTURAL INTEGRITY OF VESSELS IN THE UNDERWATER ENVIRONMENT

Анотація

Регулярна інспекція корпусу судна дозволяє виявляти пошкоджені ділянки та оцінювати ступінь деградації матеріалу корпусу, що дозволяє підтримувати необхідний ступінь міцності шляхом відповідного технічного обслуговування та забезпечує безпеку судноплавства. Традиційні методи інспекції корпусу значною мірою залежать від роботи водолазів, які оглядають весь корпус та проводять заплановані перевірки. Цей процес залежить від експертної оцінки та піддається загрозам безпеці, а також є частково суб'єктивним та дорогим заходом. Останні технологічні розробки такі як роботизовані підводні апарати та штучний інтелект пропонують перспективні альтернативи для вирішення цих проблем та підвищення ефективності та безпеки підводних інспекцій.

У статті розглядаються основні знання про інспекцію корпусу судна, дано класифікацію засобів дистанційного контролю, вивчено технології візуалізації та позиціонування у підводному середовищі, а також деякі методи дистанційної підтримки та передачі даних. Визначено шляхи удосконалення та розвитку підводних інспекцій.

Ключові слова: підводно-технічні роботи, інспекція корпусу, морська безпека, стійкість портової інфраструктури, телекеровані незаселені підводні апарати, гідроакустичні датчики, підводна навігація, автоматичне розпізнавання дефектів, цифрові двійники.

Abstract

Regular inspection of the ship's hull allows to detect damaged areas and assess the degree of degradation of the hull material, which allows to maintain the required degree of strength through appropriate maintenance and ensures the safety of navigation. Traditional methods of hull inspection depend largely on the work of divers who inspect the entire hull and carry out scheduled inspections.

This process depends on expert judgment and is subject to safety threats, and is also partly subjective and expensive. Recent technological developments such as robotic underwater vehicles and artificial intelligence offer promising alternatives to solve these problems and increase the efficiency and safety of underwater inspections.

The article reviews the basic knowledge of ship hull inspection, gives a classification of remote control tools, studies visualization and positioning technologies in the underwater environment, as well as some methods of remote support and data transmission. Ways of improving and developing underwater inspections are identified.

Keywords: underwater technical work, hull inspection, maritime safety, port infrastructure stability, remotely controlled unmanned underwater vehicles, hydroacoustic sensors, underwater navigation, automatic defect recognition, digital twins.

Вступ. Морський транспорт можна розглядати як найважливішу частину глобального ланцюжка поставок завдяки його здатності перевозити великі обсяги товарів на великі відстані та позитивний компроміс між швидкістю і вартістю. У той же час зростання судноплавної галузі збільшує ймовірність морських аварій, які становлять загрозу для життя людей, економічної власності та забруднення морського середовища. Однією з основних причин серйозних морських аварій є руйнування конструкції, що виникає в результаті впливу залежать від часу (поступових) механізмів зносу, таких як перевантаження конструкції, помилки в проектуванні суден, використання низькоякісних матеріалів, неякісне юстирування або зварювання, руйнування покриття і вібрації, викликані гідродинамічними навантаженнями чи механізмами.. Щоб уникнути (або зменшити) виникнення цих факторів, судна будуються відповідно до суворих стандартів

безпеки та запобігання забруднення. У цьому випадку своєчасне технічне обслуговування та ремонт судна організовуються на основі виявлених дефектів та несправностей. В результаті конструкції корпусу можуть підтримуватись у задовільному стані, а ризик виникнення руйнування конструкції знижується [3].

В даний час огляд корпусу судна проводиться в рамках класифікаційних оглядів, які здійснюють класифікаційні товариства відповідно до суворих правил. Сучасні протоколи інспекцій зазвичай потребують регулярних та наперед визначених інтервалів. Згідно з Міжнародною морською організацією (IMO) протягом п'яти років має бути проведено як мінімум дві зовнішні інспекції корпусу з інтервалами не більше 36 місяців. Під час цих підводних інспекцій інспектор відповідає за огляд всього корпусу, оцінку структурної цілісності та виявлення потенційних ділянок руйнування [2]. Цей процес надає інспекторам-водолазам значних ризиків для безпеки через необхідність доступу до небезпечних місць, таких як підводні ділянки, замкнуті простори та важкодоступні зони. Крім того, зображення, отримані під час інспекції, мають бути оцінені кваліфікованими експертами із класифікаційних товариств, які обирають небезпечні місця для подальшого аналізу цілісності. Відмінності в судженнях експертів можуть впливати на вибір ділянок для більш детальних інспекцій, включаючи вимір товщини.

Постановка проблеми. Водолазні роботи є актуальними для сфери експлуатації та обслуговування водного транспорту, оскільки дозволяють виконувати огляд та оперативний ремонт підводної частини суден без їх переміщення в док. Не менш важливими є такі роботи і для забезпечення безпеки судноплавства, а також створення та обслуговування мереж підводних комунікацій та оперативного усунення наслідків різних техногенних катастроф.

Ця сфера висуває найвищі вимоги як до кваліфікації співробітників, так і до обладнання, що використовується. Найменша помилка або неполадка під час занурення може спричинити трагічні наслідки різних масштабів. Перехід до автономних та телекерованих систем багато в чому змінює підхід до виконання водолазних робіт, сприяє підвищенню безпеки та зниженню витрат. Ці технології активно розвиваються та впроваджуються, що відкриває нові горизонти для підводних досліджень та експлуатації підводних ресурсів. Актуальні дослідження, розвиток технологій та статистика впровадження подібних систем у цій галузі сприяє покращенню стандартів безпеки та ефективності у водолазній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Детальний огляд методів візуальної інспекції (GVI, DVI, CVI) та переходу від водолазних робіт до робіт-інтервентів представлений Mietkiewicz, R. (2023) [1]. Дослідження використання телекерованих безлюдних підводних апаратів у каламутній воді портових акваторій із застосуванням модульованого освітлення проведено Kaizer, Adam & Lednicka, Barbara & Tessmer, Agnieszka & Freda, Wlodzimierz & Soszynska-Budny, Joanna & Ziajka, Ewelina. (2025) [6]. Матеріали щодо створення віртуальних моделей підводної інфраструктури та автоматизації аналізу даних представлені у роботі Deep Trekker Report (2024) [8]. Проблематиці інтеграції цифрових двійників з VR та II для моніторингу стану судів у реальному часі присвячено роботу Markopoulos, E., et al. (2024) [16]. Огляд технологічних бар'єрів та перспектив створення "цифрових двійників океану" представлений Bachelor, et al. (2025). [17]. Опис технологій точної навігації (DVL, USBL) у обмежених умовах портів та інженерних споруд дано MDPI Remote Sensing (2022) [19]. Глобальний огляд технологій підводного зв'язку (акустичного, оптичного та гібридного) проведено Xu, Jiajie & Irigoien, Xabier & Alouini, Mohamed-Slim. (2024) [20]. Опанований масив джерел демонструє можливість переходу до повністю

роботизованої інспекції підводних об'єктів та обґрунтовує можливість створення системи дистанційної оцінки та моніторингу стану конструкцій судна та портової інфраструктури.

Метою статті є дослідження процесів проведення підводно-технічних робіт та моніторингу, існуючих рішень для дистанційної інспекції корпусу судна без залучення водолазів та запропонувати систему інтегруючу комп'ютерний зір на основі нейронних мереж для підводних інспекцій корпусу та знизити ризики для людського життя, а також впливу людського фактора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційно підводна інспекція виконувалася водолазами, які візуально ідентифікували потенційні пошкодження корпусу та збирали матеріали для оцінки та підтвердження необхідних заходів для відновлення цілісності інспектованої підводної частини. Через фінансові обмеження та вимоги безпеки на робочому місці державні відомства скорочують використання водолазних бригад, які можуть бути недоступні в короткі терміни або умови можуть бути просто занадто небезпечними для проведення занурень, що потребує альтернативних варіантів, які можуть бути використані для проведення водолазних робіт.

Під впливом розвитку технологій безпілотних літальних апаратів стали з'являтися дистанційно керовані підводні апарати та засоби дитячого контролю. Поєднання конкуренції та технологічного розвитку швидко обмежило їх можливості та знизило вартість. Аналогічна конструкція виникає і щодо ряду допоміжного обладнання, наприклад, гідролокаторів, підводних систем, маніпуляторів і камер, які використовують обладнання з дистанційно керованим підводним обладнанням для дочірніх досліджень, інспекції порту, системної інспекції порту з різними ракурсами, наприклад, паль причалу, плавучих сопів, пристроїв, включаючи морське дно,

розташоване під ними, а також проводить інспекцію пристрій. морського судна, детальна перевірка всіх підводних поверхонь морського судна, включаючи важкодоступні місця, такі як кінгстони та носові пристрої, що підрулюють.

У всіх описаних вище сценаріях підводні апарати з дистанційним керуванням повинні вміти точно переміщатися, отримувати високоякісні візуальні зображення та, по можливості, відокремлювати фрагменти для послідовного дослідження. Розглянемо наявні засоби дистанційного контролю.

Телекеровані безлюдні підводні апарати (ТБПА або ROV - remotely operated underwater vehicle) – це роботизовані системи, з'єднані кабелем із судном, керовані оператором із поверхні. Вони використовуються для інспекції, відеозйомки, моніторингу інфраструктури та виконання легких маніпуляцій на глибині.

Основні характеристики та призначення:

Управління: Пілот здійснює контроль у реальному часі через кабель, отримуючи дані телеметрії, гідролокатора та відеозображення.

Призначення: Обстеження трубопроводів, корпусів суден, гідротехнічних споруд, пошукові роботи, океанологічні дослідження.

Комплектація: Оснащуються камерами високої роздільної здатності, освітленням, датчиками, а часто – маніпуляторами для простих завдань (захоплення предметів, очищення).

Відрізняються від автономних апаратів (AUV - autonomous underwater vehicle) наявністю фізичного зв'язку з оператором, що забезпечує необмежений час під водою.

Автономні безлюдні підводні апарати (АБПА/AUV) – це робототехнічні комплекси, що діють без кабелю та участі оператора, призначені для дослідження, картографування морського дна, патрулювання та моніторингу

акваторій. Вони оснащені сонарами та камерами, працюючи від батарей, що робить їх незамінними для військових, наукових та комерційних завдань.

Ключові характеристики та функції:

Автономність: Діють заздалегідь запрограмованим маршрутом, здатні самостійно приймати рішення.

Застосування: Патрулювання кордонів, картографування рельєфу дна, пошук об'єктів, екологічний моніторинг.

Обладнання: Використовують гідролокатори бічного огляду, профілактографи, камери високої роздільної здатності та системи навігації.

АНПА підвищують ефективність підводних робіт та знижують ризики для водолазів та екіпажів суден.

Магнітні гусеничні роботи (Hull Crawlers) – пристрої буквально «прилипають» до сталевого корпусу судна за допомогою потужних магнітних коліс або гусениць.

Принцип роботи: Робот переміщається по борту або днищу, забезпечує стабільну картинку навіть за сильної течії, яка може зносити звичайний ROV.

Функціонал: Часто використовують для УЗК-товщинометрії (вимірювання толщин металу) та високоточної дефектоскопії.

Порівняння технологій наведено у таблиці 1.

Підводні акустичні сенсорні мережі (UASN - Underwater Acoustic Sensor Networks) - це технологія, що швидко розвивається і являють собою стаціонарні сенсорні системи моніторингу, розгорнуті на морському дні. Складаються з датчиків та апаратів, що використовують акустичні хвилі для зв'язку та виконання завдань спільного моніторингу у водному середовищі. Ключові компоненти включають різні датчики та акустичні модеми. UASN дозволяють виконувати різні завдання моніторингу у різних секторах:

Таблиця 1

Порівняльна таблиця технологій дистанційної інспекції

Технологія	Плюси	Мінуси
Телекеровані безлюдні підводні апарати (ROV)	Маневреність, відео 4K у реальному часі	Залежність від течії та довжини кабелю
Магнітні гусеничні роботи (Hull Crawlers)	Ідеальні для вимірів товщини, стабільність.	Обмежені лише феромагнітними поверхнями
Автономні безлюдні підводні апарати (AUV)	Висока швидкість, автономність	Висока вартість, відсутність контролю у реальному часі

Моніторинг довкілля та клімату: Збір даних у режимі реального часу про температуру, солоність та тиск води для відстеження зміни клімату та забруднення.

Дослідження в галузі морської біології (відстеження моделей переміщення морських тварин та моніторинг чутливих місцеперебування, таких як коралові рифи).

Підводне спостереження та військові завдання - відстеження підводних човнів, виявлення мін та виявлення загроз безпеці.

Розвідка нафти та газу на шельфі.

Моніторинг сейсмічної активності та бурових робіт для запобігання стихійним лихам, таким як цунамі.

Переваги: Стаціонарне становище дозволяє вести безперервний багаторічний моніторинг однієї акваторії з високою точністю, недоступною рухомим суднам [5].

Для забезпечення життєздатності розглянутих технологій потрібна можливість підводного зв'язку між підводними пристроями. Підводні

сенсорні вузли та апарати повинні мати можливості самоконфігурації, тобто вони повинні вміти координувати свою роботу шляхом обміну інформацією про конфігурацію, місцезнаходження та рух, а також передавати дані моніторингу на берегову станцію. Бездротова підводна акустична мережа є технологією, що забезпечує ці програми. Підводні акустичні сенсорні мережі (UW-ASN – Underwater acoustic sensor networks) складаються зі змінного числа датчиків та транспортних засобів, які розгортаються для виконання завдань спільного моніторингу на заданій території. Для досягнення цієї мети датчики та транспортні засоби самоорганізуються в автономну мережу, яка може адаптуватися до характеристик океанічного середовища.

Таким чином визначено необхідність розгортання підводних мереж, які дозволять здійснювати необхідний моніторинг у режимі реального часу, налаштування та взаємодію з наземними операторами. В даний час багато дослідників займаються розробкою мережевих рішень для наземних бездротових самоорганізованих та сенсорних мереж. Існує безліч нещодавно розроблених мережевих протоколів для бездротових сенсорних мереж, унікальні характеристики підводного акустичного каналу зв'язку, такі як обмежена пропускна здатність та змінні затримки, потребують дуже ефективних та надійних нових протоколів передачі даних.

Основні проблеми при проектуванні підводних акустичних мереж:

• Доступна пропускна здатність дуже обмежена;

• Підводний канал сильно спотворений, особливо через багатопроменеве поширення та завмирання;

• Затримка поширення в підводному каналі на п'ять порядків вища, ніж у наземних радіочастотних каналах, та надзвичайно мінлива;

• Через екстремальні характеристики підводного каналу можуть спостерігатися високі показники бітових помилок та тимчасові втрати зв'язку (тіньові зони);

• Заряд батареї обмежений, і зазвичай батареї не можна перезарядити, у тому числі через те, що сонячна енергія не може бути використана;

• Підводні датчики зазнають відмов через забруднення та корозію.

Для безвідмовної роботи підводних роботів необхідні пристрої, що забезпечують огляд, у тому числі й у каламутній воді, обладнання для побудови 3D-моделей, прилади підводної навігації та надійні канали зв'язку передачі даних та дистанційної підтримки.

Успішне планування та виконання підводних інженерних, інспекційних та ремонтних робіт критично залежать від оптичних характеристик водного середовища. Зокрема, два ключові параметри — коефіцієнт відображення дистанційного зондування та каламутність — відіграють важливу роль у характеристиці прозорості води, умов поширення світла та загальної придатності даної водойми для операцій, що ґрунтуються на візуальному вимірі. Ці параметри особливо актуальні в портовому середовищі, де наявність зважених частинок, розчинених органічних та неорганічних речовин, а також вуглеводневих забруднюючих речовин, таких як нафта істотно впливає на підводну видимість і якість зображення [7]. За результатами досліджень технологічні розробки мають бути зосереджені на створенні динамічних систем керування освітленням та впровадженні автоматизованих інструментів аналізу зображень для оптимізації процесу інспекції та підвищення надійності виявлення дефектів. Інтеграція передових систем освітлення та адаптивних технологій може ще більше розширити можливості ROV, забезпечуючи ефективніші та результативніші підводні інспекції [6].

Використання лазерного сканування під водою (U-LiDAR) – це технологічний прорив, який дозволив перенести точність наземної геодезії до морського середовища. На відміну від сонарів, лазер дає деталізацію до міліметрів, що критично для гідротехнічних споруд і дозволяє виявляти

деформацій (крен опор, випучування шпунтових стінок або розмив основи), інспектувати зварні шви і тріщини, дає можливість «пошити» наземне лазерне сканування (верхня частина. дозволяє інтегрувати отримані дані в цифрове середовище, в концепції «Підводного інтернету речей» (IoUT), є основним джерелом даних для цифрового двійника порту. Порівняльний аналіз багатопроменевого ехолота та підводного лідара представлений у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз U-LiDAR та багатопроменевого ехолота

Характеристика	Підводний LiDAR	Багатопроменевий ехолот
Фізичний принцип	Світловий імпульс (лазер)	Акустичний імпульс (звук)
Точність / Роздільна здатність	Висока (до 1-5 мм). Видно тріщини, болти, маркування.	Середня (від 10-50 мм). Видно загальні форми і рельєф.
Дальність дії	Мала (зазвичай до 5-10 метрів залежно від прозорості).	Велика (десятки та сотні метрів).
Залежність від середовища	Критична каламутність води (завис розсіює світло).	Критична температура та солоність (впливають на швидкість звуку).
Щільність хмари точок	Екстремально висока (мільйони точок на м²).	Висока, але нижча, ніж у лазера.
Основне призначення	Детальна інспекція вузлів, 3D-моделювання.	Картування дна, пошук великих об'єктів, навігація.

Для позиціонування підводних роботів (ROV/AUV) використовуються дві основні акустичні технології, що розрізняються за точністю, складністю розгортання та принципом роботи.

1. LBL (Long Baseline) - Довга база, технологія використовує мережу стаціонарних маяків-транспондерів, встановлених на морському дні по периметру робочої зони, методом трилатерації по дистанцію, які визначаються як час проходження сигналів, що вимірюється роботом до декількох донних маяків обчислюються. Точність виміру досить висока і становить від кількох сантиметрів до дециметрів. Похибка стабільна і залежить від глибини. Технологія вимагає тривалої підготовки (установка та калібрування маяків на дні). Підходить для тривалих робіт на одному об'єкті: моніторингу трубопроводів, будівництва та детального картографування [9].

2. USBL (Ultra-Short Baseline) – Ультракоротка база, ця технологія заснована на тому, що всі датчики інтегровані в одну компактну головку (трансівер), встановлену на судні забезпечення. Трансивер вимірює дистанцію до робота (за часом) і напрямок на нього (за фазовим зсувом сигналу між датчиками всередині головки, база яких зазвичай менше 10 см). Точність вимірювань становить приблизно 0,5-1% від похилої дальності. Це означає, що що далі робот від судна, то вища похибка. Переваги цього у тому, що досить опустити штангу з трансивером за борт тобто. забезпечує швидке розгортання та мобільність. Метод оптимально підходить для відстеження рухомих роботів та дайверів у реальному часі [10].

Зведена таблиця технологій підводного позиціонування представлена таблицею 3.

Метою дослідження є перехід від водолазних робіт за участю людини до використання автономних та телекерованих систем, інтегрованих у єдине цифрове середовище порту або судна за допомогою підводного інтернету речей – IoUT, що неможливо без надійних каналів зв'язку. Передача сигналу

під водою завжди компроміс між дальністю і швидкістю. Радіохвилі (акустичні модеми, звук) майже повністю поглинаються солоною водою (крім вкрай низьких частот).

Таблиця 3

Порівняння технологій підводного позиціонування.

Характеристика	LBL (Довга база)	USBL (Ультракоротка база)
Точність	Найвища (см/дм)	Залежить від дистанції (0.5-3%)
Встановлення	Складна (сітка на дні)	Проста (на борту судна)
Зона покриття	Обмежена розставленою мережею	Вся зона навколо судна (до 4-11 км.)
Застосування	Високоточне будівництво	Супровід та пошук роботів

У свою чергу використання «вікна прозорості» води в синьо-зеленому спектрі (450–550 нм) дозволяє передавати дані зі швидкістю до кількох Гбіт/с вузьким променем лазера, який складно перехопити або заглушити, що уможливлює транслювати HD-відео в реальному режимі часу для моніторингу, спеції та оцінки стану підводних. Т.к. акустика залишається стандартом для дальньої навігації та телеметрії, а синьо-зелені лазери незамінні для високошвидкісного стикування та передачі важких даних на коротких дистанціях [11], то перспективним є розвиток та застосування гібридних систем, у яких поєднується далекобійність звуку зі швидкістю світла лазера. У таких пристроях обидва модулі працюють у зв'язці, компенсуючи недоліки один одного. Гібридні системи мають підвищену енергоефективність, т.к. оптична передача вимагає менше енергії на біт даних, ніж акустична, тому гібридні системи заощаджують заряд батарей

при великих обсягах інформації та забезпечують необхідний рівень надійності - дублювання каналів зв'язку різної фізичної природи робить систему стійкою до специфічних перешкод (наприклад, коли шум гвинтів глушить акустику, лазер продовжує працювати) [12].

Вивчивши сучасні існуючі інструменти, технології та методи водолазних робіт, логічним рішенням буде створення технології віддаленої присутності, що дозволяють експертам з будь-якої точки світу керувати підводною операцією в реальному часі, використовуючи концепцію «Берегового центру управління».

Традиційні методи прогнозування корозії підводних об'єктів ґрунтуються на врахуванні характеристик матеріалу та експлуатаційних параметрів, таких як температура, pH, тиск та хімічний склад рідини. Математичні та статистичні моделі дозволяють виявляти кореляції між експлуатаційними параметрами та розвитком корозійних процесів [13]. Однак такі підходи обмежені: вплив багатьох факторів та їх складна взаємодія часто не враховується повністю, що знижує точність прогнозування та ускладнює реалізацію ефективних стратегій технічного обслуговування. Для подолання цих обмежень були запропоновані методи штучного інтелекту, включаючи машинне навчання та глибокі нейронні мережі, що дозволяє виявляти складні закономірності між множинними параметрами, покращуючи точність прогнозів та забезпечуючи більш надійну оцінку ступеня корозії [14]. З розвитком обчислювальних ресурсів дослідники почали використовувати глибокі нейронні мережі для аналізу зображень підводних об'єктів. Застосування згорткових нейронних мереж дозволяє досягати високої точності класифікації до 98,8%, однак такі результати досягаються в основному за рахунок великих обсягів даних та значної кількості ітерацій навчання. Виникає необхідність оптимізації архітектур та методів обробки зображень для підвищення ефективності

аналізу при обмежених ресурсах та обсягах даних, що можливо при синхронізації даних підводного сканування з цифровим двійником (Digital Twin) шляхом створення динамічної віртуальної копії, що відображає реальний стан об'єкта в агресивному середовищі. Це критично важливо для об'єктів підводної інфраструктури (трубопроводів, опор платформ), де візуальний огляд утруднений.

Висновки. Проведено дослідження процесів проведення підводно-технічних робіт та аналізу існуючих рішень для дистанційної інспекції корпусу судна без залучення водолазів. Проведено порівняльний аналіз пристроїв дистанційної підводної інспекції, обладнання сканування морського середовища та корпусу судна, а також технологій підводного позиціонування. Перспективи розвитку розглянутих методів та інновацій зумовлює перехід до повної автономності підводних інспекцій за допомогою системи, що інтегрує комп'ютерний зір на основі нейронних мереж для підводних інспекцій корпусу, що дозволить знизити ризики для людського життя, а також впливу людського фактора. Зниження витрат на водолазні служби та зменшення простоїв суден дозволяє досягти економічної ефективності.

Загалом така система використовує автономні підводні апарати (AUV/ROV) для сканування за допомогою гідролокаторів, LiDAR або фотограмметрії, збирає необхідні дані, які звіряються з архівними 3D копіями об'єкта (Цифровим двійником) та даними датчиків IoT (температура, вібрація). Для тимчасової узгодженості використовуються тимчасові мітки (timestamps), що гарантує тимчасову узгодженість між фізичним об'єктом та моделлю. Математичні моделі та алгоритми машинного навчання порівнюють поточну геометрію об'єкта з проектною, виявляючи корозію, деформацію або розмив основи. Система моделює «що» сценарії, передбачаючи залишковий ресурс і визначаючи оптимальний час для

ремонту, що знижує ризик аварій та операційні витрати. Такий підхід трансформує обслуговування з реактивного в проактивне, дозволяючи «побачити» невидимі під водою процеси старіння матеріалів і уможливлює перехід до повної автономності підводних інспекцій, дозволяючи підключати до операції фахівців з усього світу одночасно, знижуючи логістичні витрати на відправку людей у море і дозволяючи одному береговому центру по черзі або паралельно курирувати кілька інспекцій.

Список використаних джерел

1. Mietkiewicz, R. (2023). Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots. Frontiers in Robotics and AI.

2. Edilson Gabriel Veruz, Alécio Julio Silva, Miguel Angelo de Carvalho Michalski, Renan Favarão da Silva, Gilberto Francisco Martha de Souza, Anderson Takehiro Oshiro A framework for planning underwater hull inspections based on computer vision and degradation assessment https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120053

3. Joseph Davies, Huy Truong-Ba, Michael E. Cholette, Geoffrey Will, Optimal inspections and maintenance planning for anti-corrosion coating failure on ships using non-homogeneous Poisson Processes https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109695

4. Ellard, K. E., (2022). Review and Enhancement of Remotely Operated Vehicles for Marine pest Surveillance: Phase 2. Invasive Species Branch, Biosecurity Tasmania, Department of Natural Resources and Environment Tasmania.
https://www.researchgate.net/publication/371783768_Review_and_Enhancement_of_Remotely_Operated_Vehicles_for_Marine_Pest_Surveillance_Phase_2_Project_Report

5. Akyildiz, Ian & Pompili, Dario & Melodia, Tommaso. (2005). Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. Ad Hoc Networks. 3. 257-279. 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.

6. Kaizer, Adam & Lednicka, Barbara & Tessmer, Agnieszka & Freda, Wlodzimierz & Soszynska-Budny, Joanna & Ziajka, Ewelina. (2025). Use of an ROV with Modulated Lighting for Diagnosing the Technical Condition of Submerged Port Wharf Structures. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 19. 477-482. 10.12716/1001.19.02.17.

7. Lednicka B, Otremba Z, Piskozub J. Light Penetrating the Seawater Column as the Indicator of Oil Suspension Monte Carlo Modelling for the Case of the Southern Baltic Sea. Sensors. 2023;23(3):1175.

8. Deep Trekker Report (2024). Underwater Vessel Inspections: A New Perspective. Marlow Offshore.

9. Elaine Rowan (UK), January 19, 2008, LBL Underwater Positioning, Электронный ресурс, URL: https://www.hydro-international.com/content/article/lbl-underwater-positioning, дата доступу 03.01.2026

10. Fiveable. (2024, July 30). 7.1 Acoustic positioning systems – Underwater Robotics. https://fiveable.me/underwater-robotics/unit-7/acoustic-positioning-systems/study-guide/bkm1QFSPtc4TtzyC, дата доступу 03.01.2026

11. Yuan, R.; Zhang, T.; Li, C.; Gao, H.; Hu, L. Laser Transmission Characteristics of Seawater for Underwater Wireless Optical Communication. Sensors 2025, 25, 3057. https://doi.org/10.3390/s25103057

12. Tabacchiera, Marco & Moriconi, Claudio & Cupertino, Giacomo & Betti, Silvello. (2015). Hybrid Acoustic Optic Communications in Underwater Swarms. 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271401.

13. Velazquez J.C., Caleyo F., Valor, A., Hallen J. M. Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines // Corrosion. 2002. № 65. Cc. 332–342.

14. Coelho, L.B., Zhang, D., Van Ingelgem, Y. et al. Reviewing machine learning of corrosion prediction in a data-oriented perspective // npj Mater Degrad. 2022. № 6. https://doi.org/10.1038/s41529-022-00218-4.

15. Bhowmik, Subrata. (2019). Digital Twin of Subsea Pipelines: Conceptual Design Integrating IoT, Machine Learning and Data Analytics. 10.4043/29455-MS.

16. Markopoulos, E., et al. (2024). The Impact of Digital Twins Technology in Maritime Fleet and Safety Management. UCL Discovery.

17. Bachelor, et al. (2025). A Review of the Applications of Digital Twin Technology in Marine Research. ResearchGate.

18. MDPI Water (2025). Underwater Digital Twin Sensor Network-Based Maritime Communication and Monitoring.

19. MDPI Remote Sensing (2022). A Technique to Navigate Autonomous Underwater Vehicles Using a Virtual Coordinate Reference Network during Inspection of Industrial Subsea Structures.

20. Xu, Jiajie & Irigoien, Xabier & Alouini, Mohamed-Slim. (2024). State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications. 10.48550/arXiv.2412.18667.

21. APL-UW Report (2020/2024 updated). Resident AUV: Maintenance and Operation of Installations.

Reference

1. Mietkiewicz, R. (2023). Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots. Frontiers in Robotics and AI.

2. Edilson Gabriel Veruz, Alécio Julio Silva, Miguel Angelo de Carvalho Michalski, Renan Favarão da Silva, Gilberto Francisco Martha de Souza, Anderson Takehiro Oshiro A framework for planning underwater hull inspections based on computer vision and degradation assessment https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120053

3. Joseph Davies, Huy Truong-Ba, Michael E. Cholette, Geoffrey Will, Optimal inspections and maintenance planning for anti-corrosion coating failure on ships using non-homogeneous Poisson Processes https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109695

4. Ellard, K. E., (2022). Review and Enhancement of Remotely Operated Vehicles for Marine pest Surveillance: Phase 2. Invasive Species Branch, Biosecurity Tasmania, Department of Natural Resources and Environment Tasmania. https://www.researchgate.net/publication/371783768_Review_and_Enhancement_of_Remotely_Operated_Vehicles_for_Marine_Pest_Surveillance_Phase_2_Project_Report

5. Akyildiz, Ian & Pompili, Dario & Melodia, Tommaso. (2005). Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. Ad Hoc Networks. 3. 257-279. 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.

6. Kaizer, Adam & Lednicka, Barbara & Tessmer, Agnieszka & Freda, Wlodzimierz & Soszynska-Budny, Joanna & Ziajka, Ewelina. (2025). Use of an ROV with Modulated Lighting for Diagnosing the Technical Condition of Submerged Port Wharf Structures. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 19. 477-482. 10.12716/1001.19.02.17.

7. Lednicka B, Otremba Z, Piskozub J. Light Penetrating the Seawater Column as the Indicator of Oil Suspension Monte Carlo Modelling for the Case of the Southern Baltic Sea. Sensors. 2023;23(3):1175.

8. Deep Trekker Report (2024). Underwater Vessel Inspections: A New Perspective. Marlow Offshore.

9. Elaine Rowan (UK), January 19, 2008, LBL Underwater Positioning, Электронный ресурс, URL: https://www.hydro-international.com/content/article/lbl-underwater-positioning, access date 03.01.2026

10. Fiveable. (2024, July 30). 7.1 Acoustic positioning systems – Underwater Robotics. https://fiveable.me/underwater-robotics/unit-7/acoustic-positioning-systems/study-guide/bkm1QFSPtc4TtzyC, access date 03.01.2026

11. Yuan, R.; Zhang, T.; Li, C.; Gao, H.; Hu, L. Laser Transmission Characteristics of Seawater for Underwater Wireless Optical Communication. Sensors 2025, 25, 3057. https://doi.org/10.3390/s25103057

12. Tabacchiera, Marco & Moriconi, Claudio & Cupertino, Giacomo & Betti, Silvello. (2015). Hybrid Acoustic Optic Communications in Underwater Swarms. 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271401.

13. Velazquez J.C., Caleyo F., Valor, A., Hallen J. M. Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines // Corrosion. 2002. № 65. Cc. 332–342.

14. Coelho, L.B., Zhang, D., Van Ingelgem, Y. et al. Reviewing machine learning of corrosion prediction in a data-oriented perspective // npj Mater Degrad. 2022. № 6. https://doi.org/10.1038/s41529-022-00218-4.

15. Bhowmik, Subrata. (2019). Digital Twin of Subsea Pipelines: Conceptual Design Integrating IoT, Machine Learning and Data Analytics. 10.4043/29455-MS.

16. Markopoulos, E., et al. (2024). The Impact of Digital Twins Technology in Maritime Fleet and Safety Management. UCL Discovery.

17. Bachelor, et al. (2025). A Review of the Applications of Digital Twin Technology in Marine Research. ResearchGate.

18. MDPI Water (2025). Underwater Digital Twin Sensor Network-Based Maritime Communication and Monitoring.

19. MDPI Remote Sensing (2022). A Technique to Navigate Autonomous Underwater Vehicles Using a Virtual Coordinate Reference Network during Inspection of Industrial Subsea Structures.

20. Xu, Jiajie & Irigoien, Xabier & Alouini, Mohamed-Slim. (2024). State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications. 10.48550/arXiv.2412.18667.

21. APL-UW Report (2020/2024 updated). Resident AUV: Maintenance and Operation of Installations.