

**Богом`я В.І.**

## **МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО СОНАРУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ БЕЗПЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ**

*Метою роботи є дослідження і розробка методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки безпілотних підводних апаратів і підвищення ефективності та безпеки досліджень підводних комунікацій. Аналіз предметної області показав, що зі збільшенням кількості підводних комунікацій і їх довжини зростає необхідність періодичного огляду для виявлення пошкоджень і сторонніх предметів, які можуть привести до аварій. На сьогоднішній день для обстеження використовуються різні засоби, такі як надводні судна, водолази і дистанційно керовані підводні апарати. Однак ці методи мають свої обмеження, що призводить до дорожнечі і складності робіт. Безпілотні підводні апарати є перспективним рішенням проблеми обстеження підводних комунікацій. Вони відрізняються тривалою автономністю, великою маневреністю і відносно низькою вартістю. Крім того, вони можуть оснащуватися різними датчиками для збору даних про стан комунікацій. У статті були наведені результати розробки методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки безпілотних підводних апаратів й ефективного обстеження підводних комунікацій. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятьма і більше пучками можуть успішно ідентифікувати протяжні об'єкти з різним перетином. Імовірність виявлення навіть частково прихованих об'єктів огляду становить понад 0,85, що достатньо для управління безпілотними підводними апаратами. Таким чином, розроблений метод виявлення за допомогою багатопроменевого сонару може бути ефективно застосований в безпілотних системах управління підводними апаратами для обстеження підводних комунікацій з високою точністю і надійністю. Це дає можливість підвищити безпеку і ефективність обстеження і підтримувати підводні комунікації в належному стані.*

**Ключові слова:** багатопроменевий сонар, безпілотні підводні апарати, обстеження підводних комунікацій, розпізнавання підводних об'єктів, безпека, моделювання, безекіпажне судно, пошук на морі, роботизований комплекс .

**Постановка проблеми.** У міру збільшення кількості підводних комунікацій і їх протяжності все більш актуальним стає завдання періодичного огляду цих комунікацій. Обстеження необхідно проводити для виявлення пошкоджень або наявності сторонніх предметів, які можуть привести до виходу з ладу або пошкодження комунікацій. Зазвичай для обстеження підводних комунікацій використовуються надводні судна, водолази, буксировані і дистанційно керовані підводні апарати. Однак ці методи мають ряд обмежень, таких як висока вартість, складність та обмежена автономність. Безпілотний підводний апарат (БПА) є перспективним рішенням проблеми вивчення підводних комунікацій. БПА може тривалий час перебувати під водою, має велику дальність дії, маневрений і відносно недорогий. Крім того, БПА може оснащуватися різними датчиками, які дозволяють йому збирати дані про стан підводних комунікацій. Однак існує ряд проблем, які необхідно вирішити для ефективного використання БПА для обстеження підводних комунікацій. Однією з проблем є підвищення точності і надійності виявлення (розпізнавання) підводних комунікацій. Ефективним і точним методом виявлення підводних об'єктів є багатопроменеві сонари. Однак вони мають ряд

проблем, які необхідно вирішити для ефективного використання з БПА. Однією з проблем є те, що багатопротеневий сонар, як правило, є чутливим до шуму, що може знизити його точність. Ще одна проблема полягає в тому, що багатопротеневий сонар – дорогий пристрій, що може обмежити його використання в деяких випадках. Незважаючи на ці проблеми, багатопротеневий сонар є важливим інструментом безпеки БПА. Пристрій дозволяє виявляти підводні об'єкти, що допомагає БПА уникнути зіткнення з ними і тим самим уникнути пошкоджень. Багатопротеневий сонар також використовується для картографування підводного простору, що дозволяє БПА безпечно пересуватися. Таким чином, вивчення підходів до підвищення ефективності використання багатопротеневого гідролокатора для забезпечення безпеки БПА є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час існує значна кількість досліджень щодо покращення ефективності управління безпілотними підводними апаратами [1 - 10].

Наприклад, в статті [1] наведено короткий огляд різних стратегій спільного пошуку й управління формуванням для декількох автономних підводних апаратів (autonomous underwater vehicles (AUV)), заснованих на опублікованих літературних даних. Обговорюються різні схеми спільного та групового управління для збору величезних обсягів даних, заснованих на управлінні регулюванням резервуарів та управлінні простежуваністю резервуарів. Для вирішення проблеми виявлення відмови AUV на флоті також враховуються питання зв'язку, уникнення зіткнень та уникнення перешкод. Також представлений аналіз стійкості можливого резервуара.

У статті [2] описана конструкція автономного/дистанційного підводного апарату Intelligence Ocean I (IO-I), здатного працювати в режимі АНПА й отримувати інформацію про морське середовище і власні дані про стан. Наведені рівняння динаміки підводних апаратів по горизонталі і вертикалі, що описують рух підводного апарату з урахуванням сили тяжіння, плавучості, тяги і гідродинамічної сили. Крім того, для реалізації високоточного автоматичного управління роботом нечіткий алгоритм управління, пов'язаний з інтелектуальним управлінням, поєднується з каскадним алгоритмом ПІД-регулятора для реалізації модифікованого алгоритму управління підводним апаратом, що покращує застосовність алгоритму управління і знижує складність і трудомісткість налаштування параметрів.

У роботі [3] представлений вдосконалений контролер часової затримки (time-delay controller (TDC)) для контролю положення автономного підводного апарату в умовах збурення. Звичайний TDC добре працює, коли мова йде про високі показники збору даних. Однак програми управління AUV, які використовують навігаційну систему доплерівського журналу швидкостей (Doppler velocity log (DVL)), не можуть підтримувати достатньо високу швидкість збору даних, оскільки датчик DVL зазвичай надає дані з низькою швидкістю збору, що знижує продуктивність TDC. Щоб подолати цю проблему, автори пропонують вбудовану ковзну ручку на додаток до звичайного TDC для підвищення точності управління навіть при працюючій навігаційній системі DVL. Запропонований контролер є обчислювально простим і стійким до незмодельованої динаміки і збурень.

**Метою роботи** є дослідження та розробка методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопротеневого сонару для забезпечення безпеки БПА та підвищення ефективності та безпеки проведення зйомок підводних комунікацій.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Безпілотні підводні апарати оснащені ехолокаційними далекомірами для організації руху і збору інформації поблизу землі. Однак поточні дані акустичних далекомірів несуть неповну інформацію про форму навколишніх предметів. Це пояснюється тим, що акустичні далекоміри вимірюють лише відстань до об'єкта, але не його форму. Для отримання тривимірної картини навколишніх об'єктів необхідно об'єднати дані акустичних далекомірів з координатами носія в моменти вимірювання відстаней.

Об'єднання даних акустичних далекомірів з координатами носія дозволяє отримати тривимірну картину навколишніх об'єктів. Ця інформація може бути використана для

організації руху БПА, збору інформації про підводний світ та загалом забезпечення безпеки БПА.

Запропонований метод розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопрменевого сонару для забезпечення безпеки БПА складається з двох етапів (рис. 1):

1. Перший етап, коли БПА використовує ехолокаційні та навігаційні системи для побудови моделі зовнішнього середовища. У цьому випадку завдання розпізнавання досліджуваного об'єкта зводиться до завдання тривимірного розпізнавання акустично видимої частини об'єкта на тлі дна.

2. Другий етап, коли форма підводного об'єкта штучного походження (ПОШП) порівнюється з формою обстежуваної частини дна за допомогою алгоритму, заснованого на нечіткій логіці. Алгоритм визначає міру впевненості в знаходженні об'єкта в обстежуваній частині поверхні дна, а також взаємне розташування БПА та об'єкта обстеження.

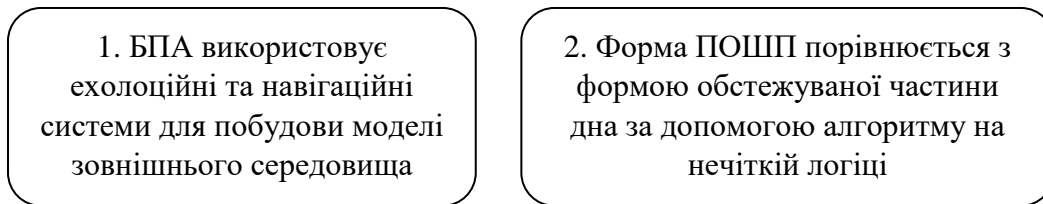


Рисунок 1 – Узагальнена структура методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопрменевого сонару для забезпечення безпеки БПА

Модель рельєфу дна описує поверхню за допомогою параметричної функції. Ця функція дозволяє зберігати інформацію про складну місцевість та інші об'єкти, які неможливо описати за допомогою карти висот (наприклад, трубопровід). Координати точок місця розраховуються на підставі даних навігаційної системи, відомого положення антен системи ехолокації на борту БПА та їх показань. Припустимо, що об'єкт дослідження однозначно визначається формою його поперечного розділу. Це означає, що можна визначити нечіткі значення «поверхні» та «неповерхні» для всіх відгуків в області ПОШП. Для виявлення об'єкта досить знайти точку, розташовану на його поверхні і яка лежить над поздовжньою віссю ПОШП. Алгоритм розпізнавання полягає в тому, що для кожного нового відгуку вважається гіпотеза про його приналежність до вершини шуканого об'єкта. Алгоритм визначає міру впевненості в тому, що відгук належить вершині об'єкта і порівнює її з пороговим значенням. Якщо довірча міра вище порога, то відгук вважається приналежністю до вершини об'єкта.

Міра впевненості в наявності ПОШП в даній точці розраховується на основі таких нечітких продукційних правил:

1. «ЯКЩО кількість точок навколишнього середовища, що належать поверхні об'єкта, більше порогового значення, ТО оцінка існування об'єкта в точці висока».

2. «ЯКЩО кількість точок навколишнього середовища, розташованих в місцях, де вони не можуть бути розташовані, більше порогового значення, ТО оцінка існування об'єкта в точці низька».

Перше правило говорить, що чим більше точок навколишнього середовища належить поверхні об'єкта, тим вище ймовірність того, що об'єкт існує в цій точці. Порогове значення визначає, скільки точок навколишнього середовища потрібно для того, щоб об'єкт вважався існуючим. Нечіткі продукційні правила використовуються для обліку невизначеності даних. Наприклад, якщо кількість точок навколишнього середовища дорівнює пороговому значенню, то не можна з повною впевненістю сказати, існує об'єкт чи ні.

Друге правило говорить, що чим більше точок навколишнього середовища розташовано в місцях, де вони перебувати не можуть, тим нижче ймовірність того, що об'єкт існує в цій точці. Порогове значення визначає, скільки точок навколишнього середовища потрібно для того, щоб об'єкт вважався неіснуючим. Наприклад, якщо навколишні точки розташовані всередині, безпосередньо під об'єктом або занадто далеко від нього, то вони не можуть належати поверхні

об'єкта. Таким чином, їх кількість буде включена до числа точок, розташованих в місцях, де вони перебувати не можуть. Це призведе до зменшення оцінки існування ПОШП у точці.

Формально значення показника наявності ПОШП у певній точці рельєфу дна  $[X_0; Y_0; Z_0]^T$  визначаються за таким виразом

$$\vartheta_0 = \sum_{t=t_0}^{t_0-\Delta t} \sum_{s=1}^S (V_1 \mu_1(\Delta x(t, s), \Delta z(t, s)) - V_2 \mu_2(\Delta x(t, s), \Delta z(t, s))), \quad (1)$$

де  $\Delta x(t, s), \Delta z(t, s)$  – координати проєкцій точок нижньої поверхні на площину з координатами центру в точці  $[X_0; Y_0; Z_0]^T$  і нормаллю, яка спрямована уздовж об'єкта виявлення ( $\Delta x$  – вісь праворуч,  $\Delta z$  – верх);

$\Delta t$  – інтервал часу, з якого вибираються точки навколишнього середовища;

$S$  – кількість акустичних далекомірів;

$V_1, V_2$  – ваги функцій приналежності.

Запропонований метод розпізнавання ПОШП має особливість, що дозволяє формувати функції приналежності для об'єктів довільної форми. Це означає, що метод здатний виявити такі протяжні об'єкти, як трубопроводи (в тому числі з некруглим перетином), траншеї і т. д. Опис шуканого об'єкта може бути задано як аналітично (для об'єктів простої форми), так і з табличною формою і у вигляді графіків функцій приналежності.



Рисунок 2 – Виявлення протяжного підводного об'єкта штучного походження

На рис. 2 наведено варіант проведення модельних експериментів з розпізнавання трубопроводів. Ширина смуги по траєкторії БПА відображає площу поверхні дна, покритої в'ялом гідроакустичних променів. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятима і більше пучками можуть ідентифікувати протяжний об'єкт (з поперечним перерізом від 0,5 до 2 метрів) незалежно від взаємної орієнтації БПЛА і ПОШП. Імовірність виявлення навіть частково прихованого об'єкта огляду вище 0,85 (чого достатньо для контролю БПА).

Модельні експерименти проводилися з використанням розробленого програмного симулятора багатопробеневого сонару. Програмний симулятор багатопробеневого сонару реалізований як набір функцій Python (використовувалися такі основні бібліотеки: NumPy (бібліотека для роботи з масивами), SciPy (бібліотека для наукових обчислень), Matplotlib (бібліотека для візуалізації даних), Pandas (бібліотека для роботи з багатовимірними даними).

Функції симулятора можна використовувати для моделювання різних типів багатопроменевих гідролокаторів, для моделювання різних типів підводних об'єктів і для моделювання різних умов навколишнього середовища.

Розроблений тренажер має у своєму складі кілька програмних модулів і працює таким чином (рис. 3). Модуль моделювання навколишнього середовища створює модель підводного простору, в якому розташований сонар. Екологічна модель містить такі об'єкти, як морське дно, підводні об'єкти, джерела шуму. Модуль моделювання сонару реалізує гідроакустичну модель. Гідроакустична модель має такі параметри, як частота, потужність і кут випромінювання сонара. Модуль обробки сигналів приймає сигнали, відбиті від підводних об'єктів, й обробляє їх. Модуль обробки сигналу розраховує розташування, форму і розміри підводних об'єктів. Модуль розпізнавання підводних об'єктів реалізує алгоритм на основі нечіткої логіки для визначення міри впевненості в знаходженні об'єкта в обстежуваній частині поверхні дна. Модуль відображення відображає результати обробки сигналу на екрані комп'ютера. Такі дані, як ехограма, розташування розпізнаних підводних об'єктів і їх характеристики, можуть бути показані на екрані комп'ютера.

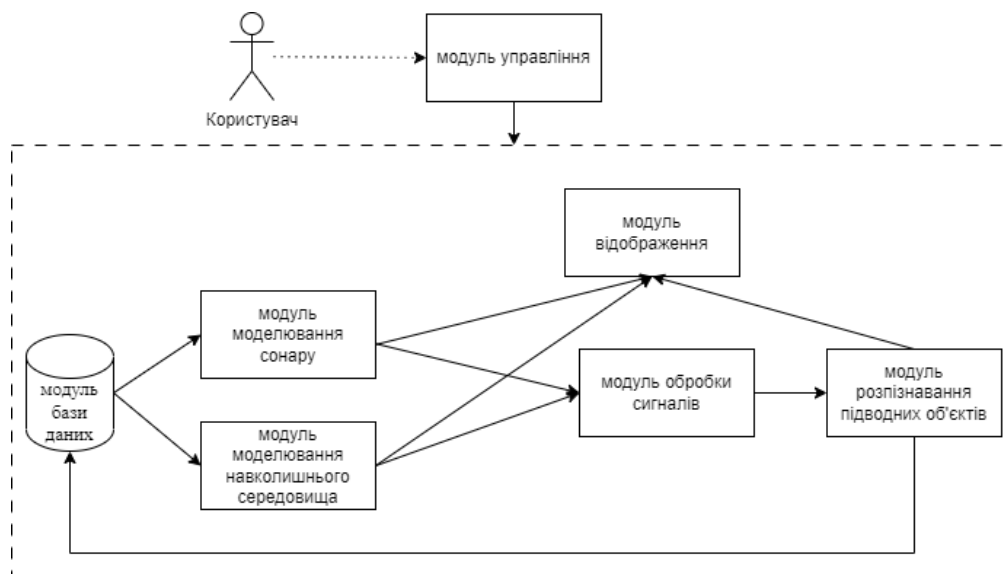


Рисунок 3 – Узагальнена архітектура програмного симулятора багатопроменевого сонару

Обмеження і припущення, що накладаються на процес модельного експерименту з використанням розробленого програмного симулятора багатопроменевого гідролокатора:

- 1) симулятор імітує тільки статичне середовище. Динамічні об'єкти, такі як рухомі кораблі, не моделюються;
- 2) симулятор імітує тільки одиночний сонар. Спільна робота декількох гідролокаторів не імітується;
- 3) тренажер імітує тільки ідеальні умови. Шум, відлуння з дна моря та інші фактори, які можуть вплинути на якість ехограми, не моделюються.

**Висновки.** Підводні комунікації грають важливу роль. Однак вони схильні до різних небезпек та аварій. Щоб забезпечити безпеку підводних комунікацій, необхідно регулярно їх оглядати. Безпілотні підводні апарати є перспективним рішенням проблеми обстеження підводних комунікацій. БПА відрізняються тривалою автономністю, великою маневреністю і відносно низькою вартістю. Крім того, вони можуть оснащуватися різними датчиками для збору даних про стан комунікацій. У даній роботі проведено дослідження та розробку методу розпізнавання підводних об'єктів за допомогою багатопроменевого сонару для забезпечення безпеки БПА та ефективного обстеження підводних комунікацій. Моделювання показало, що ехолокаційні системи з десятьма і більше пучками можуть успішно ідентифікувати протяжні об'єкти з різним перетином.

Таким чином, розроблений метод виявлення з використанням багатопрменевого сонару може бути ефективно застосований в системах управління БПА для обстеження підводних комунікацій з високою точністю і надійністю. Це дає можливість підвищити безпеку і ефективність обстеження і підтримувати підводні комунікації в належному стані.

## REFERENCES

1. Das, B., Subudhi, B. & Pati, B.B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview. *Int. J. Autom. Comput.* 13, 199–225 (2016).
2. F. Kong, Y. Guo and W. Lyu, "Dynamics Modeling and Motion Control of an New Unmanned Underwater Vehicle," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 30119-30126, 2020.
3. J. Kim, H. Joe, S. -c. Yu, J. S. Lee and M. Kim, "Time-Delay Controller Design for Position Control of Autonomous Underwater Vehicle Under Disturbances," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1052-1061.
4. Xiang-Rui Huang, Liang-Bi Chen, "An underwater explorer remotely operated vehicle: Unraveling the secrets of the ocean", *IEEE Potentials*, vol.42, no.3, pp.31-36, 2023..
5. Chinonso E. Okereke, Mohd Murtadha Mohamad, Nur Haliza Abdul Wahab, Olakunle Elijah, Abdulaziz Al-Nahari, S. Zaleha.H, "An Overview of Machine Learning Techniques in Local Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles", *IEEE Access*, vol.11, pp.24894-24907, 2023.
6. Anggun Winursito, Oktaf A. Dhewa, Aris Nasuha, Gilang N. P. Pratama, "Integral State Feedback Controller with Coefficient Diagram Method for USV Heading Control", 2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), pp.295-300, 2022.
7. Rasheed Abdulkader, "Non-integer Controller for Autonomous Underwater Vehicle Steering Control", 2021 IEEE International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON), pp.102-105, 2021.
8. Meng Zhang, Jin Chen, Liang Wang, "Research on Deep Control Simulation of Small UUV Based on Pan-Boolean PID", 2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT), pp.119-122, 2021.
9. GuanJun Yang, Weiran Wang, Jinghao Yan, Pengfei Zhi, Huilin Ge, Zhiyu Zhu, "Improved Multi-Motor Synchronization Control of Underwater Robot Based on Virtual Shaft", 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp.4652-4657, 2021.
10. Sudarshan K. Valluru, Karan Sehgal, Hitesh Thareja, "Evaluation of Moth-Flame Optimization, Genetic and Simulated Annealing tuned PID controller for Steering Control of Autonomous Underwater Vehicle", 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), pp.1-6, 2021.

### Bohomia V.I.

#### A METHOD FOR RECOGNIZING UNDERWATER OBJECTS USING MULTIBEAM SONAR TO ENSURE THE SAFETY OF AN UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

*The aim of the work is to research and develop a method for recognizing underwater objects using multibeam sonar to ensure the safety of unmanned underwater vehicles and improve the efficiency and safety of underwater communications research. The analysis of the subject area showed that with the increase in the number of underwater communications and their length, the need for periodic inspection to identify damage and foreign objects that can lead to accidents increases. Today, various means are used for survey, such as surface vessels, divers and remotely controlled underwater vehicles. However, these methods have their limitations, which leads to high cost and complexity of work. Unmanned underwater vehicles are a promising solution to the problem of surveying underwater communications. They are characterized by long-term autonomy, high maneuverability and relatively low cost. In addition, they can be equipped with various sensors to collect data on the*

*state of communications. In this work, research and development of a method for recognizing underwater objects using multibeam sonar were carried out to ensure the safety of unmanned underwater vehicles and effective shooting of underwater communications. Simulations have shown that echolocation systems with ten or more beams can successfully identify extended objects with different cross-sections. The probability of detecting even partially hidden objects of vision is more than 85%, which is enough to control unmanned underwater vehicles. Thus, the developed multibeam sonar detection method can be effectively applied in unmanned underwater vehicle control systems to survey underwater communications with high accuracy and reliability. This makes it possible to increase the safety and efficiency of the survey and maintain underwater communications in proper condition.*

**Keywords:** *multibeam sonar, unmanned underwater vehicles, survey of underwater communications, recognition of underwater objects, safety, modeling.*

УДК 681.5.04

doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.11

*Дубинець О.І.*

### **МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ АНОМАЛІЙ У ВИТРАТІ ДИЗЕЛІВ МОРСЬКОГО СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОЕНКОДЕРА ІЗ ПОДАВЛЕННЯМ ШУМУ**

*Метою статті є автоматизація процесу виявлення аномалій, пов'язаних із деградацією дизелів морських суден на основі автоенкодера із подавленням шуму. Методи виявлення аномалій спрямовані на виявлення відхилень від типового функціонування. З точки зору системи прогнозування та управління станом (Prognostics and health management (PHM)), яка оперує даними, такі відхилення можуть слугувати індикаторами початку відмов. Виявлення несправностей є першим та критично важливим етапом в системах PHM, які працюють на основі даних. Розроблена в статті модель для автоматизованого виявлення спектральних аномалій у деградації дизелів морських суден, незалежно від типу несправності, ґрунтується на автоенкодері із подавленням шуму (Denoising Autoencoder (DAE)), який навчається на попередньо оброблених даних нормальної експлуатації. Навчання DAE полягає в пошуку оптимальних параметрів кодувальника та декодувальника, які мінімізують функцію втрат. Важливим аспектом є те, що DAE навчається на зашумлених версіях даних, що допомагає видобувати стійкі та інформативні ознаки. Потім навчена модель DAE використовується для розрахунку швидкості та прискорення оцінки аномалії на кожному часовому кроці в даних з деградацією в разі несправності. Одночасно встановлюються загальні та динамічні порогові значення. Розрахунки та порогові значення динамічно змінюються з часом. Це дозволяє виконувати виявлення несправностей в режимі онлайн. Запропонована модель продемонструвала високу ефективність у виявленні трьох типів несправностей дизелів морських суден: засмічення повітряного фільтра, несправності турбокомпресора та несправності вентилятора із частотним керуванням. Модель може використовуватися для виявлення несправностей в режимі онлайн, що дозволяє вчасно вживати заходів для їх усунення. Модель може бути використана для виявлення несправностей в режимі реального часу, що дозволяє вчасно приймати заходи для їх усунення. Модель має перспективи для*