

УДК 629.58  
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).11](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).11)

## DEVELOPMENT OF A LABORATORY BENCH FOR CALIBRATION OF THE NAVIGATION MODULE OF AN UNDERWATER VEHICLE

### РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ НАВІГАЦІЙНОГО МОДУЛЯ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Andrii M. Voitasyk  
andrii.voitasyk@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-9409-6108

А. М. Войтасик,  
канд. техн. наук, доцент

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

**Abstract.** *Purpose.* Development and design of a laboratory stand for calibrating the navigation module of an underwater vehicle with the possibility of ensuring its operation with the required accuracy. *Method.* As part of the research, the complex modeling method was used to build 3D models of the frame of the laboratory stand and all the executive equipment proposed to be used in it, the method of empirical description of technological processes to justify and explain the features of the stand organization, the method of conducting an experiment to explain the methodology of magnetometer calibration implementation. *Results.* Based on the use of three-phase hybrid stepper electric motors equipped with bevel gears, control drivers, DC battery power sources and the proposed design of the electric mechanism for changing the position in the space of the navigation module, located in the middle of the assembled durable housing from the underwater vehicle, a laboratory stand was developed for its further use during implementation of debugging and calibration of the accuracy of the navigation module of the underwater vehicle. The operation of the electric drive of the stand is controlled from a personal computer. *Scientific novelty.* Compensation of the impact of negative factors on errors in the operation of the underwater vehicle navigation system is proposed to be implemented using a laboratory stand equipped on the basis of a table frame structure with a wheel base. The stand includes a set of necessary equipment interconnected in accordance with the proposed magnetometer calibration algorithm, which allows its effective implementation in tasks of setting up the navigation module of the underwater vehicle. *Practical importance.* The developed laboratory stand is designed in the form of a frame structure on a wheel base and provides for the presence in the process of calibration of sensors to use electric mechanisms for changing the position in the space of the navigation module, located in the middle of the assembled strong body of the underwater vehicle. The stand uses rechargeable DC power sources, which makes it possible to eliminate the possibility of twisting of cable connections in the process of spatial rotation of the durable body of the underwater vehicle relative to the three directions of the axes of the navigation module. The proposed laboratory stand during the implementation of the calibration process is able to eliminate several negative factors in the operation of the navigation module, among which we can note: deviation, skewing when incorrectly installed and deviations in sensor readings. The use of a laboratory stand provides an opportunity to ensure the necessary accuracy of the magnetometer calibration process, which is later provided for use as part of the navigation module of the underwater vehicle.

**Key words:** stand; navigation; sensor; calibration.

**Анотація.** *Мета.* Розробка та проектування лабораторного стенду для калібрування навігаційного модуля підводного апарата з можливістю забезпечення його роботи з необхідною точністю. *Методика.* В рамках дослідження використано метод комплексного моделювання для побудови 3D моделей каркасу лабораторного стенду та всього виконавчого обладнання, яке запропоновано застосувати у його складі, метод емпіричного опису технологічних процесів для обґрунтування та пояснення особливостей організації стенду, метод проведення експерименту для пояснення методології реалізації калібрування магнітометра. *Результати.* На базі використання трифазних гібридних крокових електродвигунів облаштованих конічними передачами, драйверів керування, акумуляторних джерел живлення постійного струму та запропонованої конструкції електроприводного механізму зміни положення у просторі навігаційного модуля, розміщеного в середині зібраного міцного корпусу від підводного апарата, розроблено лабораторний стенд для подальшого його використання під час виконання процесів налагодження та калібрування точності роботи навігаційного модуля підводного апарата. Керування

роботою електропривода стенда виконується від персонального комп'ютера. *Наукова новизна.* Компенсацію впливу негативних факторів на похибки в роботі навігаційної системи підводного апарата запропоновано реалізовувати з застосуванням лабораторного стенду облаштованого на базі столу рамної конструкції з колісною базою. До складу стенду входить комплект необхідного обладнання поєднаного між собою відповідно до запропонованого алгоритму калібрування магнітометра, що дозволяє його ефективне впровадження в задачах налаштування навігаційного модуля підводного апарата. *Практична значимість.* Розроблений лабораторний стенд спроектований у вигляді рамної конструкції на колісній базі та передбачає наявність в процесі виконання калібрувань сенсорів застосовувати електроприводні механізми зміни положення у просторі навігаційного модуля, розташованого в середині зібраного міцного корпусу підводного апарата. У складі стенду застосовані акумуляторні джерела живлення постійного струму, що дозволяє усунути вірогідність переключування кабельних зв'язків в процесі просторового обертання міцного корпусу підводного апарата відносно трьох напрямків осей навігаційного модуля. Запропонований лабораторний стенд під час реалізації процесу калібрування здатен усунути декілька негативних факторів в роботі навігаційного модуля, серед яких можна зазначити: девіацію, перекошування при неправильному встановленні та відхилення у показаннях сенсорів. Застосування лабораторного стенду надає можливість забезпечити необхідну точність процесу калібрування магнітометра, який у подальшому передбачено для використання у складі навігаційного модуля підводного апарата.

**Ключові слова:** стенд; навігація; сенсор; калібрування.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Навігаційний пристрій малогабаритного підводного апарата (ПА) призначено для вимірювання його базових кінематичних параметрів: глибини, курсу, крену та диференту. Для визначення кутового положення ПА в просторі використовуються трьохосьові магнітометри, суміщені з трьохосьовими акселерометрами. Для визначення глибини використовуються сенсори тиску, призначені для роботи в рідинах. Сукупність таких сенсорів, виконаних в єдиному виробі з відповідним програмним забезпеченням утворюють навігаційний пристрій для малогабаритного ПА.

При встановленні навігаційного пристрою на ПА неможливо уникнути мікро-перекосів та інших неточностей без використання спеціального обладнання, які погіршують точність роботи навігаційного пристрою. Крім того, магнітометри представляють собою сенсори, досить чутливі до зовнішніх чинників і потребують усунення девіації. Сенсори тиску також потребують калібрування, оскільки умови виконання підводно-технічних робіт (ПТР) можуть впливати на їх показання.

Виробники сенсорів пропонують певні алгоритми для виконання процедури калібрування, проте ефективне їх застосування неможливе без розробки відповідного апаратно-програмного забезпечення. Тому, набуває актуальності задача розробки та проектування лабораторного стенду для калібрування навігаційного модуля ПА з можливістю забезпечення його роботи з необхідною точністю.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

При русі ПА в просторі важливим чинником є відстеження його абсолютних координат. Відстеження координат ПА може виконуватися за допомогою як зовнішніх так і внутрішніх систем сенсорів [1, 2, 3]. В загальному випадку сенсори, які використовуються

при керуванні ПА, можна розділити на сенсори зворотного зв'язку, та сенсори зовнішніх і внутрішніх збурень [4, 5, 6].

Сенсори зворотного зв'язку називають приладами морської навігації, які є основними для здійснення керування ПА і призначені для вимірювання їх кінематичних параметрів [7, 8, 9]. Серед них можна виділити прилади, призначені для визначення поточного місцезнаходження і напрямку руху та прилади вимірювання динамічних параметрів ПА. Сенсори зовнішніх та внутрішніх збурень призначені для вимірювання інших параметрів ПА та зовнішнього середовища, які мають вплив на його рух: сил натягу кабель-тросу (КТ), температури, густини води тощо [10, 11, 12].

До приладів навігації ПА відносяться: магнітні компаси, інерційні навігаційні системи, ехолоти, гіперболічні радіонавігаційні та супутникові навігаційні системи [13, 14, 15]. В основі роботи магнітних компасів полягає вплив магнітного поля Землі (МПЗ) на магнітну стрілку, яка при відсутності сторонніх магнітних впливів орієнтується вздовж силової лінії МПЗ у напрямку Північного магнітного полюса [16, 17]. Інерційні навігаційні системи (ІНС) бувають платформні та безплатформні і забезпечують безперервне вироблення інформації про курс, координати, швидкість руху і кутову орієнтацію ПА [18, 19]. Перевагами ІНС є автономність та відсутність демаскуючих ознак, що обумовило їх використання на кораблях Військово-морських сил, особливо у складі навігаційних комплексів підводних човнів.

Найбільш розповсюдженим гідроакустичним засобом є ехолот – прилад, який вимірює глибину під кілем судна та може виконувати інші корисні вимірювання, наприклад щільності та шарової структури ґрунту [20, 21]. Гіперболічні радіонавігаційні системи використовують сімейства гіпербол як основу для визначення координат [22, 23]. Супутникові

навігаційні системи забезпечують глобальне високоточне визначення координат надводних частин ПА в будь-якому районі Світового океану [24, 25, 26].

Навігаційний модуль малогабаритного підводного апарата (ПА) призначено для вимірювання його базових кінематичних параметрів: глибини, курсу, крену та диференту, і повинен містити відповідні сенсори та системи їх калібрування [27, 28, 29]. Однак, дані які надходять від таких сенсорів, як наприклад, магнітометр містять в собі дані, що можуть бути спотворені за рахунок локальних змін в електромагнітному полі Землі від твердих та м'яких в магнітному відношенні матеріалів [30, 31]. Для зменшення цього впливу на інформаційний канал потрібно виконувати калібрування магнітометра [32, 33].

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Кутове положення ПА у тривимірному просторі визначається кутами Ейлера. Цифровий електронний компас дозволяє отримати відносні величини проєкцій вектора магнітного поля Землі та вектора прискорення вільного падіння на вісі зв'язаної системи координат ПА. У разі, коли кути крену та диференту ПА дорівнюють  $0^\circ$  кут курсу може бути визначений за виразом

$$\varphi = \arctg(Y_H / X_H),$$

де  $\varphi$  – значення кута курсу в радіанах;

$Y_H$ ,  $X_H$  – складові проєкції вектора магнітного поля Землі на зв'язану горизонтальну площину ПА.

У разі, коли ПА знаходиться під нахилом (кут крену та/або диференту не рівний  $0^\circ$ ), розрахунки кута курсу необхідно проводити з урахуванням поправки на крен та диферент ПА, оскільки змінюються значення  $Y_H$  та  $X_H$ . Це може бути виконано за допомогою розрахунків

$$X_h = X_M \cos \psi + Z_M \sin \psi,$$

$$Y_h = X_M \sin \theta \sin \psi + Y_M \cos \theta - Z_M \sin \theta \cos \psi,$$

де  $Y_h$ ,  $X_h$  – складові проєкції вектора магнітного поля Землі на зв'язану горизонтальну площину ПА;

$X_M$ ,  $Y_M$ ,  $Z_M$  – показання, отримані від магнітометра;

$\theta$ ,  $\psi$  – кути крену та диференту відповідно.

Однак, існує ряд факторів, які істотно впливають на точність вимірювань електронного компасу. Це спричинює появу похибок в обчисленні кутів Ейлера на базі отриманих від сенсора показань. До таких факторів належать: девіація магнітного компасу, спричинена впливом на останній твердих в магнітному відношенні матеріалів; перекося в положенні сенсора, які могли виникнути при монтажі останнього на друковану плату вимірюючого пристрою або при інтегруванні вимірюючого пристрою до складу ПА; відхилення в показаннях акселерометру та магнітометра.

Для компенсації впливу даних негативних факторів на показання навігаційної системи ПА

запропоновано розробити допоміжний лабораторний стенд з можливістю реалізації методології калібрування магнітного компасу.

**Метою дослідження** є розробка та проектування лабораторного стенду для калібрування навігаційного модуля підводного апарата з можливістю забезпечення його роботи з необхідною точністю.

### ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості *об'єкта дослідження* обрано технологічні процеси, які здатен реалізовувати саморухомий прив'язний підводний апарат облаштований навігаційним модулем.

*Предметом дослідження* є моделі та методи калібрування сенсорів підводного апарата для запровадження необхідної точності їх роботи, реалізація електроприводного механізму зміни положення у просторі навігаційного модуля, розміщеного в середині зібраного міцного корпусу від підводного апарата, та забезпечення сумісності застосованого обладнання, створення 3D моделей складових елементів обладнання та загальної конструкції лабораторного стенду.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Розробку лабораторного стенду виконано з урахуванням масогабаритних характеристик міцного корпусу для ПА проекту «Гідрограф» (рис. 1) в середині якого розміщується його навігаційний модуль. Для зміни положення у просторі навігаційного модуля розроблено 3D модель електроприводного механізму обертання.



**Рис. 1.** 3D модель міцного корпусу для ПА проекту «Гідрограф»

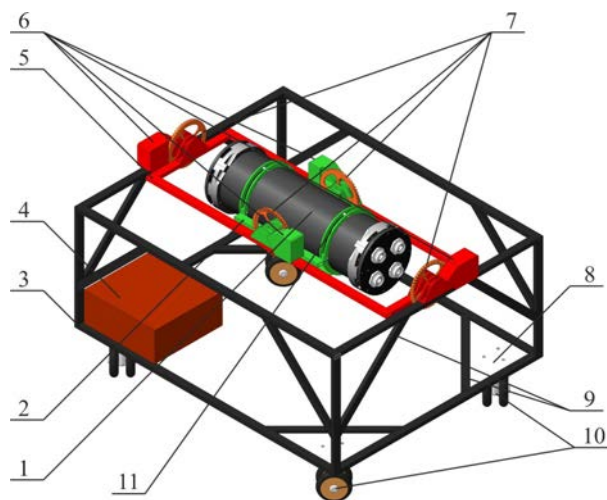
а) – вид спереду; б) – вид ззаду

Герметичність міцного корпусу наведеного на рис. 1 забезпечується застосуванням відповідних елементів герметизації, а саме: панельної частини герметичного роз'єму та пробки. Для герметизації виробів використовуються гумові кільця.

До складових елементів розробленого лабораторного стенду для калібрування навігаційного модуля ПА належать: рамна конструкція; крокові двигуни з конічними передачами; підшипникові опори разом з валами та шестернями; дві поворотні платформи; портативне акумуляторне джерело живлення 3,3 В та 5 В; джерело постійного живлення 60 В; колісна база; елементи кріплення.

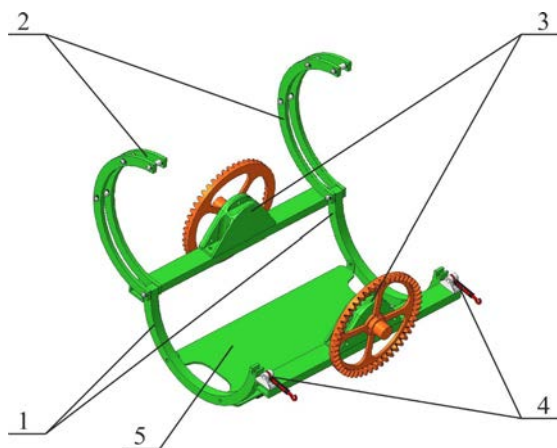
В розробленій 3D моделі лабораторного стенду передбачено застосування портативного джерела

живлення для навігаційного модуля. Дане джерело живлення забезпечує два необхідних номінали постійної напруги 3,3 В та 5 В. З цією метою застосовується портативний акумулятор.



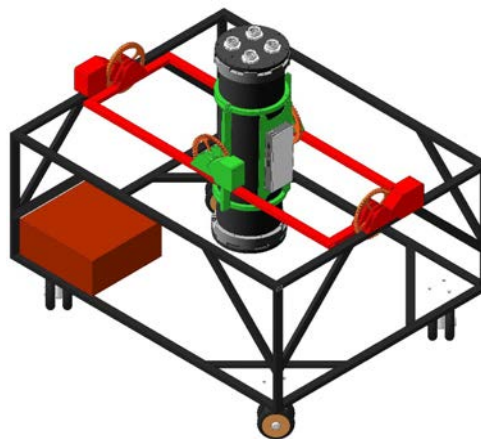
**Рис. 2.** 3D модель електропривода лабораторного станду 1) – міцний корпус; 2) – перша поворотна платформа; 3) – рамна конструкція станду; 4) – джерело постійного живлення 60 В; 5) – друга поворотна платформа; 6) – крокові двигуни; 7) – шестерні; 8) – опорні полиці; 9) – ребра міцності; 10) – колісна база; 11) – поворотний хомут

В якості джерела живлення постійного струму використовується акумуляторне джерело живлення (АДЖ) номіналом 60 В. Для реалізації можливості повороту міцного корпусу з навігаційним модулем розроблено спеціальне кріплення (рис. 3).



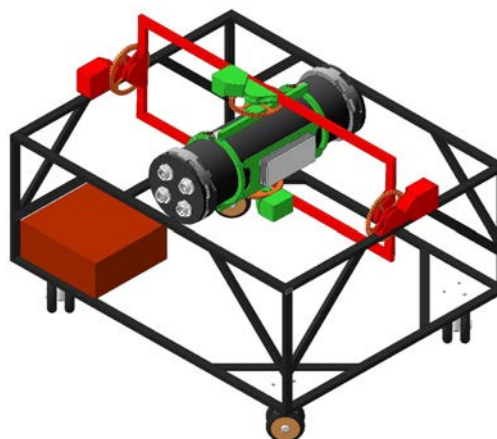
**Рис. 3.** 3D модель кріплення міцного корпусу 1) – капролонова основа; 2) – поворотні хомути; 3) – підшипникові опори; 4) – талрепи; 5) – полиця для розміщення портативного джерела живлення

З шестернями представленими на рис. 3 з'єднуються конічні передачі крокових двигунів. Кінці обертових валів закріплюються в підшипникових опорах першої поворотної платформи (рис. 4).



**Рис. 4.** 3D модель лабораторного станду під час повороту першої платформи на 90°

Для збереження центру мас міцного корпусу та зменшення масогабаритних характеристик застосованих крокових двигунів кожний поворотний механізм облаштовується двома виконавчими механізмами. Таке рішення дозволить рівномірно розподілити навантаження на валах електродвигунів, що виключатиме можливість перекошування поворотних частин. Також, це суттєво покращить ресурс конічної передачі в виду того, що зубці на шестернях зазнаватимуть менших навантажень. З'єднання другої поворотної платформи виконується аналогічно першій (рис. 5).



**Рис. 5.** 3D модель лабораторного станду під час повороту першої та другої платформи на 90°

Обертання міцного корпусу з навігаційним модулем в процесі калібрування навколо вертикальної вісі реалізовано без застосування електропривода, тобто в ручну. Головними елементами такого руху слугують чотири колеса закріплені на опорних полицях рамної конструкції лабораторного стану (рис. 6).

Колеса зафіксовані під кутами 45°, що дозволяє виконувати повороти лише навколо вертикальної вісі в двох напрямках: за годинниковою стрілкою; проти годинникової стрілки.

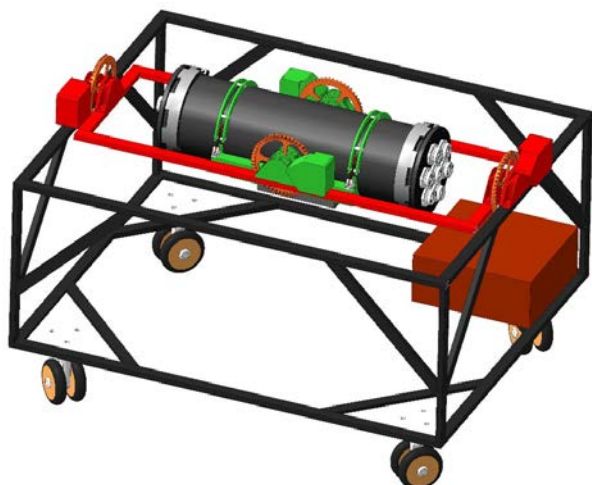


Рис. 6. 3D модель лабораторного стенду під час повороту міцного корпусу навколо вертикальної вісі

Допустимі кути для повороту у зазначених трьох осях становлять  $360^\circ$ . Підключення роз'ємів в міцному корпусі здійснюється за допомогою кабелів заборотної комутації. З обох кінців зазначених кабелів розташовані кабельні частини, що мають бути сполучені з панельними на корпусі лабораторного стенду.

Методика калібрування магнітометра виконується згідно зі схемою представленою на рис. 7 і полягає в наступному. Поблизу місця, де проводиться калібрування, не повинно бути об'єктів, які є генераторами сильних магнітних полів. Для сполучення пристрою з показчиком напрямку на північ необхідно використовувати лазерний цілевказівник.

Алгоритм перевірки показань курсу при відсутності нахилу: встановити стенд на дерев'яну платформу; сполучити вісь  $X$  пристрою з показчиком напрямку на північ; перевірити показання курсу. Показання повинні бути в діапазоні  $0 \pm 2^\circ$ ; повернути стенд горизонтально за або проти годинникової стрілки на довільний кут; зафіксувати стенд в певному положенні; зробити кілька обертів за годинниковою стрілкою та проти неї та зупинити стенд в початковому положенні. Відхилення повинно бути в діапазоні  $\pm 2^\circ$ .

Алгоритм перевірки показань курсу в нахиленому положенні: встановити стенд на дерев'яну платформу; спрямувати вісь  $X$  пристрою в довільному напрямі, записати отримані показання; повернути платформу навколо вісі  $Y$  пристрою на додатний або від'ємний кут; перевірити показання кута диференту навігаційного модуля, відхилення повинно бути в діапазоні  $\pm 1^\circ$ , також, відхилення показань курсу повинно бути в діапазоні  $\pm 2^\circ$ ; повернути стенд в горизонтальне положення; спрямувати вісь  $X$  пристрою в довільному напрямі, записати отримані показання; повернути платформу навколо вертикальної вісі пристрою на додатний або від'ємний кут; перевірити показання кута крену навігаційного модуля.

Відхилення повинно бути в діапазоні  $\pm 1^\circ$ . Також, відхилення показань курсу повинно бути в діапазоні  $\pm 2^\circ$ .

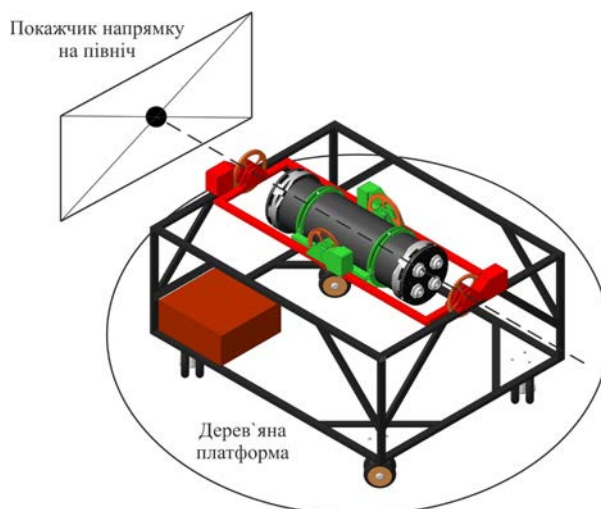


Рис. 7. Пояснювальна схема методики калібрування магнітометра з застосуванням запропонованого лабораторного стенда

Основні технічні характеристики розробки представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики розробки

| № з/п | Найменування параметра                       | Значення                                 |
|-------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1     | Постійна напруга АДЖ стенду, В               | 60                                       |
| 2     | Потужність АДЖ стенду, Вт                    | 3300                                     |
| 3     | Тип елементів АДЖ стенду                     | Li-NMC                                   |
| 4     | Постійна напруга АДЖ навігаційного модуля, В | 3,3 та 5                                 |
| 5     | Потужність АДЖ навігаційного модуля, Вт      | 15                                       |
| 6     | Привод 1-ї вісі обертання                    | електричний, кроковий SY1103P240 – 2 шт. |
| 7     | Привод 2-ї вісі обертання                    | електричний, кроковий SY130ST197 – 2 шт. |
| 8     | Привод 3-ї вісі обертання                    | ручний                                   |
| 9     | Драйвери керування кроковими двигунами       | 3DM2283 – 4 шт.                          |
| 10    | Інтерфейс керування електроприводом          | RS232                                    |
| 11    | Сумарна споживча потужність стенду, Вт       | 2000                                     |
| 12    | Габаритні розміри стенду, мм                 | 796×640×420                              |
| 13    | Маса стенду у змонтованому стані, кг         | 104                                      |

## ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Калібрування магнітометра, як складової частини навігаційного модуля ПА, запропоновано виконувати в 3 етапи:

- 1) Визначити наявність ефекту індуктивної девіації;
- 2) Компенсувати ефекти постійної та індуктивної девіації, а також похибки підсилення;
- 3) Компенсувати перекося між осями сенсора та осями ПА.

Для визначення наявності ефекту індуктивної девіації необхідно виконати тривимірні оберти пристрою в середовищі, вільному від магнітної девіації. З цією метою запропоновано реалізацію електроприводного механізму зміни положення у просторі навігаційного модуля, розміщеному в середині зібраного міцного корпусу від підводного апарата, виконаному у вигляді лабораторного стенду.

Корегування похибки перекося, між осями сенсора та осями ПА, необхідне для сполучення осей чутливих елементів магнітометра з осями зв'язаної системи координат ПА. Методика коригування перекося базується на трьох повних двовимірних обертах приладу. Для знаходження кожного з трьох нормалізованих векторів, які застосовуються для сполучення коригованих показань сенсору зі зв'язаною системою координат ПА застосуємо метод векторних скалярних добутків. Нормалізованим є вектор, модуль якого дорівнює 1. Три таких вектори формують матрицю коефіцієнтів коригування перекося. В такому разі, оберт навігаційного модуля навколо вертикальної осі зв'язаної системи координат при початковому положенні, коли вертикальна вісь навігаційного модуля спрямована вниз. Після компенсації постійної та індуктивної девіації, а також коригування коефіцієнтів підсилення графік обертання являтиме собою центроване коло. Якщо дане коло сполучене з вертикальною віссю зв'язаної системи координат ПА, то всі показання при обертанні навігаційного модуля навколо вертикальної осі, яка спрямована вниз, будуть меншими за 1. Якщо ж дана умова не виконується

необхідно визначити нормалізований вектор для сполучення кола з вертикальною віссю ПА.

Основними виконавчими елементами лабораторного стенду є трифазні гібридні крокові електродвигуни постійного струму облаштовані конічними передачами, які дозволяють через систему підшипникових опор та поворотних платформ змінювати положення у просторі навігаційного модуля, розміщеного в середині зібраного міцного корпусу від підводного апарата. Лабораторний стенд облаштовується джерелами постійної напруги номіналами 3,3, 5 та 60 В. Керування роботою електропривода лабораторного стенду передбачено з персонального комп'ютера підключеного до драйверів керування виконавчими кроковими електродвигунами через інтерфейс RS232.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблений лабораторний стенд спроектований у вигляді рамної конструкції на колісній базі та передбачає наявність в процесі виконання калібрувань сенсорів застосовувати електроприводні механізми зміни положення у просторі навігаційного модуля, розташованого в середині зібраного міцного корпусу підводного апарата.

2. У складі стенду застосовані акумуляторні джерела живлення постійного струму, що дозволяє усунути вірогідність перекручування кабельних зв'язків в процесі просторового обертання міцного корпусу підводного апарата відносно трьох напрямків осей навігаційного модуля.

3. Запропонований лабораторний стенд під час реалізації процесу калібрування здатен усунути декілька негативних факторів в роботі навігаційного модуля, серед яких можна зазначити: девіацію, перекошування при неправильному встановленні та відхилення у показаннях сенсорів.

4. Застосування лабораторного стенду надає можливість забезпечити необхідну точність процесу калібрування магнітометра, який у подальшому передбачено для використання у складі навігаційного модуля підводного апарата.

## REFERENCES

- [1] Thant Zin Htun, Hiroyoshi Suzuki, Daniel García-Vallejo, Daniel García-Vallejo (2022) On the theory and application of absolute coordinates-based multibody modelling of the rigid-flexible coupled dynamics of a deep-sea ROV-TMS (tether management system) integrated model. *Ocean Engineering*, 258 (ISSN 0029-8018). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111748
- [2] Marko Vuksic, Tonko Kovacevic, Barbara Džaja, Predrag Dukic, Slaven Sitic, Hai Nam Tran, Vincent Rodin, Laurent Lemarchand, Valérie-Anne Nicolas, Alain Plantec, Stéphane Rubini, Frank Singhoff (2022) Increasing the autonomy of an underwater ROV. *Sea tech week, Brest*.
- [3] Dai Ju, Zhao Xiaoguang, Zhao Xiaoguang, Tan Min (2002) Fuzzy logic control in autonomous ROV navigation. *TENCON '02. Proceedings, IEEE Region 10 conference on computers, communications, control and power engineering*, 3. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182629
- [4] Simon Siregar, Muhammad Ikhsan Sani, Sintong Tua Parlindungan Silalahi (2020) Single camera depth control in micro class ROV. *Telecommunication computing electronics and control*, 18(3), 1546. DOI: 10.12928/telkomnika.v18i3.14885
- [5] Lashika Medagoda, Jordan Jolly, Suchet Bargoti, Abraham Kazzaz, Junaid Khan, Hamish Morgan, Waleed Altamimi, Nasir Ahsan, Masood Naqshbandi (2020) High accuracy underwater visual measurement. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. DOI: 10.2118/203158-MS

- [6] Samer Al Kork, Sherif Said, Bilal Jabakhanji (2019) Preliminary engineering implementation on multisensory underwater remotely operated vehicle for oil spills surveillance. *3rd international conference on bio-engineering for smart technologies*.
- [7] Umberto Severino, Santina Fortuna, Antonio Lagudi, Fabio Bruno, Nikola Mišković, Vladimir Djapic (2023) Architecture of a low-cost solution for ROVs to improve navigation and data collection. *Distributed computing and artificial intelligence, special sessions I*, 20th international conference. DOI: 10.1007/978-3-031-38318-2\_22
- [8] Voitasyk A.M., Sirivchuk A.S., Klochkov O.P., Zaliziak D.V. (2019) Rozrobka systemy informatsiinoho obminu buksyruvanoho pidvodnoho aparata [Development of a towed underwater vehicle information exchange system]. *Pidvodna tekhnika ta tekhnolohiia: materialy IX vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu*. – Ch.1. – Mykolaiv: NUK, s. 44-47
- [9] Rodrigo Telles da Silva Vale (2013) ROV navigation with mechanically scanned sonar and inertial sensors. *Control applications in marine systems*, IFAC proceedings, 46(33), 221-226. DOI: 10.3182/20130918-4-JP-3022.00068
- [10] Khaled M. Salem, Mohammed Rady, Hesham Aly, Haitham Elshimy (2023) Design and implementation of a six-degrees-of-freedom underwater remotely operated vehicle. *Applied sciences*, 13(12), 6870. DOI: 10.3390/app13126870
- [11] Fabio Bruno, Antonio Lagudi, G. Ritacco, Maurizio Muzzupappa, R. Guida (2015) Opto-acoustic data fusion for supporting the guidance of remotely operated underwater vehicles. *The international archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, XL-5/W5(5), 47-53. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-47-2015.
- [12] Daniel J F Toal, Edin Omerdic, Gerard Dooly (2011) Precision navigation sensors facilitate full auto pilot control of smart ROV for ocean energy applications. *Proc. IEEE sensors*. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127381
- [13] C. Tarmey, R. Hallyburton (2004) Seacye ROV uses CDL inertial navigation for tunnel survey. *Sea Technology*, 45(12), 21-26.
- [14] Burunina Zh.Iu., Nadtochy V.A., Aloba L.T., Voitasyk A.M., Klochkov O.P., Sirivchuk A.S. (2018) Avtomatychne keruvannia pryviaznyimi pidvodnymi systemamy pry roboti z tochkovymi pidvodnymi ob'ektamy [Automatic control of tethered underwater systems when working with point underwater objects]: Navchalnyi posibnyk. – Mykolaiv: NUK, 63 s.
- [15] P. Tejaswini, I. Sai Deepika, Sakthivel Murugan Santhanam (2021) Development of a navigation and position tracking system for a remotely operated vehicle (ROV) – ORCA. *Journal of physics conference series*, 1911(1), 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1911/1/012017
- [16] Muhammad Iqbal, Masood ur Rehman, Umar Iqbal Bhatti, Najam Abbas Naqvi (2021) Magnetometer heading estimation through online calibration for land navigation applications. *Natural and applied sciences international journal*, 2(1), 56-69. DOI: 10.47264/idea.nasij/2.1.5
- [17] Vlada Sokolovic, Goran Dikic, Rade Stancic (2013) Integration of INS, GPS, magnetometer and barometer for improving accuracy navigation of the vehicle. *Defence science journal*, 63(5), 451-455. DOI: 10.14429/dsj.63.4534
- [18] Filipe Marques, Filipa Castro, Manuel Parente, Pedro Costa (2020) Visual inertial system for ROV positioning. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. DOI: 10.2118/203395-MS
- [19] Milad Hosseini, Saeed Seyedtabaai (2016) Robust ROV path following considering disturbance and measurement error using data fusion. *Applied ocean research*, 54, 67-72. DOI: 10.1016/j.apor.2015.10.009
- [20] Yanli Li, Weidong Liu, Le Li, Yichao Lou, Wenbo Zhang, Hui Feng Jiao (2023) Environmental target recognition system for ROV based on forward looking sonar. *Proceedings of 2022 international conference on autonomous unmanned systems*. DOI: 10.1007/978-981-99-0479-2\_106
- [21] Bo Zhao, Mogens Blanke, Roger Skjetne (2012) Particle filter ROV navigation using hydroacoustic position and speed log measurements. *Proceedings of the american control conference*. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315511
- [22] Cezary Specht (2021) Radio navigation systems: definitions and classifications. *Journal of navigation*. DOI: 10.1017/S0373463321000369
- [23] Ryszard J. Katulski, Jaroslaw Sadowski, Jacek Stefański, Wojciech Siwicki (2020) Hyperbolic asynchronous method of a radio navigation technique. *Applied sciences*, 10(18), 6316. DOI: 10.3390/app10186316
- [24] Massimo Caccia, Gabriele Bruzzone (2007) Execution control of ROV navigation, guidance and control tasks. *International journal of control*, 80(7), 1109-1124. DOI: 10.1080/00207170701242523
- [25] James C. Kinsey, Louis L. Whitcomb (2007) In situ alignment calibration of attitude and doppler sensors for precision underwater vehicle navigation: theory and experiment. *IEEE journal of oceanic engineering*, 32(2), 286 – 299. DOI: 10.1109/JOE.2007.893686
- [26] Giuseppe Conte, Perdon A.M., Zanoli S.M. (1995) A navigation and inspection systems for ROVs. *OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of our changing global environment*, 1. DOI: 10.1109/OCEANS.1995.526794
- [27] Nguyen Trong Yen, Quoc Khanh Nguyen, Ha Manh Thang (2022) A Calibration algorithm for microelectromechanical inertial sensors. *Journal of the universities radioelectronics*, 25(4), 90-104. DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-90-104
- [28] Meng Niu, Hongyu Ma, Xinglin Sun, Tiantian Huang, Kaichen Song (2022) A new self-calibration and compensation method for installation errors of uniaxial rotation module inertial navigation system. *Sensors*, 22(10), 3812. DOI: 10.3390/s22103812
- [29] Matvey Klimov, Sergey Vorotnikov, Nikolay A. Vibornov (2017) System calibration method of local navigation of mobiles robots. DOI: 10.21672/2074-1707-2017-37-1-106-115
- [30] Yiwei Xu, Mengmeng Guan, Jingen Wu, Dan Xian, Yongjun Du, Xianfeng Liang, Zhiguang Wang, Hui Huang, Dengfeng Ju, Libo Zhao, Shuxiang Dong, Zhongqiang Hu, Jinghong Guo, Zhuangde Jiang, Ming Liu (2022) An AC magnetic compass

based on magnetoelectric effect integrated with a calibration algorithm. *Sensors and actuators physical*, 347, 113955. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113955

- [31] Z. Chao, X. Zhang, X. Ma, C. Lü, L. Chen, X. Li (2019) Research on a new electronic compass calibration algorithm. *Chinese journal of sensors and actuators*, 32(1), 106-110. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.01.019
- [32] Jiancheng Fang, Hongwei Sun, Juanjuan Cao, Xiao Zhang, Ye Tao (2011) A novel calibration method of magnetic compass based on ellipsoid fitting. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 60(6), 2053-2061. DOI: 10.1109/TIM.2011.2115330
- [33] H. Sun, J. Fang (2009) Error modeling and calibration method of AMR compass. *Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics*, 35(1), 104-107

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Thant Zin HtunHiroyoshi SuzukiHiroyoshi SuzukiDaniel García-VallejoDaniel García-Vallejo (2022) On the theory and application of absolute coordinates-based multibody modelling of the rigid-flexible coupled dynamics of a deep-sea ROV-TMS (tether management system) integrated model. *Ocean Engineering*, 258 (ISSN 0029-8018). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111748
- [2] Marko Vuksic, Tonko Kovacevic, Barbara Džaja, Predrag Dukic, Slaven Sitic, Hai Nam Tran, Vincent Rodin, Laurent Lemarchand, Valérie-Anne Nicolas, Alain Plantec, Stéphane Rubini, Frank Singhoff (2022) Increasing the autonomy of an underwater ROV. *Sea tech week, Brest*.
- [3] Dai JuZhao Xiaoguang, Zhao Xiaoguang, Tan Min (2002) Fuzzy logic control in autonomous ROV navigation. *TENCON '02. Proceedings, IEEE Region 10 conference on computers, communications, control and power engineering*, 3. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182629
- [4] Simon Siregar, Muhammad Ikhsan Sani, Sintong Tua Parlindungan Silalahi (2020) Single camera depth control in micro class ROV. *Telecommunication computing electronics and control*, 18(3), 1546. DOI: 10.12928/telkomnika.v18i3.14885
- [5] Lashika Medagoda, Jordan Jolly, Suchet Bargoti, Abraham Kazzaz, Junaid Khan, Hamish Morgan, Waleed Altamimi, Nasir Ahsan, Masood Naqshbandi (2020) High accuracy underwater visual measurement. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. DOI: 10.2118/203158-MS
- [6] Samer Al Kork, Sherif Said, Bilal Jabakhanji (2019) Preliminary engineering implementation on multisensory underwater remotely operated vehicle for oil spills surveillance. *3rd international conference on bio-engineering for smart technologies*.
- [7] Umberto Severino, Santina Fortuna, Antonio Lagudi, Fabio Bruno, Nikola Mišković, Vladimir Djapic (2023) Architecture of a low-cost solution for ROVs to improve navigation and data collection. *Distributed computing and artificial intelligence, special sessions I, 20th international conference*. DOI: 10.1007/978-3-031-38318-2\_22
- [8] Войтасик А.М., Сірівчук А.С., Клочков О.П., Залізняк Д.В. (2019) Розробка системи інформаційного обміну буксированого підводного апарата. *Підводна техніка та технологія: матеріали IX всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю*. – Ч.1. – Миколаїв: НУК, с. 44-47.
- [9] Rodrigo Telles da Silva Vale (2013) ROV navigation with mechanically scanned sonar and inertial sensors. *Control applications in marine systems, IFAC proceedings*, 46(33), 221-226. DOI: 10.3182/20130918-4-JP-3022.00068
- [10] Khaled M. Salem, Mohammed Rady, Hesham Aly, Haitham Elshimy (2023) Design and implementation of a six-degrees-of-freedom underwater remotely operated vehicle. *Applied sciences*, 13(12), 6870. DOI: 10.3390/app13126870
- [11] Fabio Bruno, Antonio Lagudi, G. Ritacco, Maurizio Muzzupappa, R. Guida (2015) Opto-acoustic data fusion for supporting the guidance of remotely operated underwater vehicles. *The international archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, XL-5/W5(5), 47-53. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-47-2015.
- [12] Daniel J F Toal, Edin Omerdic, Gerard Dooly (2011) Precision navigation sensors facilitate full auto pilot control of smart ROV for ocean energy applications. *Proc. IEEE sensors*. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127381
- [13] C. Tarmey, R. Hallyburton (2004) Seacye ROV uses CDL inertial navigation for tunnel survey. *Sea Technology*, 45(12), 21-26.
- [14] Буруніна Ж.Ю., Надточий В.А., Алоба Л.Т., Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С. (2018) Автоматичне керування прив'язними підводними системами при роботі з точковими підводними об'єктами: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 63 с.
- [15] P. Tejaswini, I. Sai Deepika, Sakthivel Murugan Santhanam (2021) Development of a navigation and position tracking system for a remotely operated vehicle (ROV) – ORCA. *Journal of physics conference series*, 1911(1), 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1911/1/012017
- [16] Muhammad Iqbal, Masood ur Rehman, Umar Iqbal Bhatti, Najam Abbas Naqvi (2021) Magnetometer heading estimation through online calibration for land navigation applications. *Natural and applied sciences international journal*, 2(1), 56-69. DOI: 10.47264/idea.nasij/2.1.5
- [17] Vlada Sokolovic, Goran Dikic, Rade Stancic (2013) Integration of INS, GPS, magnetometer and barometer for improving accuracy navigation of the vehicle. *Defence science journal*, 63(5), 451-455. DOI: 10.14429/dsj.63.4534
- [18] Filipe Marques, Filipa Castro, Manuel Parente, Pedro Costa (2020) Visual inertial system for ROV positioning. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. DOI: 10.2118/203395-MS
- [19] Milad Hosseini, Saeed Seyedtabaii (2016) Robust ROV path following considering disturbance and measurement error using data fusion. *Applied ocean research*, 54, 67-72. DOI: 10.1016/j.apor.2015.10.009

- [20] Yanli Li, Weidong Liu, Le Li, Yichao Lou, Wenbo Zhang, Huifeng Jiao (2023) Environmental target recognition system for ROV based on forward looking sonar. *Proceedings of 2022 international conference on autonomous unmanned systems*. DOI: 10.1007/978-981-99-0479-2\_106
- [21] Bo Zhao, Mogens Blanke, Roger Skjetne (2012) Particle filter ROV navigation using hydroacoustic position and speed log measurements. *Proceedings of the american control conference*. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315511
- [22] Cezary Specht (2021) Radio navigation systems: definitions and classifications. *Journal of navigation*. DOI: 10.1017/S0373463321000369
- [23] Ryszard J. Katulski, Jaroslaw Sadowski, Jacek Stefański, Wojciech Siwicki (2020) Hyperbolic asynchronous method of a radio navigation technique. *Applied sciences*, 10(18), 6316. DOI: 10.3390/app10186316
- [24] Massimo Caccia, Gabriele Bruzzone (2007) Execution control of ROV navigation, guidance and control tasks. *International journal of control*, 80(7), 1109-1124. DOI: 10.1080/00207170701242523
- [25] James C. Kinsey, Louis L. Whitcomb (2007) In situ alignment calibration of attitude and doppler sensors for precision underwater vehicle navigation: theory and experiment. *IEEE journal of oceanic engineering*, 32(2), 286 – 299. DOI: 10.1109/JOE.2007.893686
- [26] Giuseppe Conte, Perdon A.M., Zanoli S.M. (1995) A navigation and inspection systems for ROVs. *OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of our changing global environment*, 1. DOI: 10.1109/OCEANS.1995.526794
- [27] Nguyen Trong Yen, Quoc Khanh Nguyen, Ha Manh Thang (2022) A Calibration algorithm for microelectromechanical inertial sensors. *Journal of the universities radioelectronics*, 25(4), 90-104. DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-90-104
- [28] Meng Niu, Hongyu Ma, Xinglin Sun, Tiantian Huang, Kaichen Song (2022) A new self-calibration and compensation method for installation errors of uniaxial rotation module inertial navigation system. *Sensors*, 22(10), 3812. DOI: 10.3390/s22103812
- [29] Matvey Klimov, Sergey Vorotnikov, Nikolay A. Vibornov (2017) System calibration method of local navigation of mobiles robots. DOI: 10.21672/2074-1707-2017-37-1-106-115
- [30] Yiwei Xu, Mengmeng Guan, Jingen Wu, Dan Xian, Yongjun Du, Xianfeng Liang, Zhiguang Wang, Hui Huang, Dengfeng Ju, Libo Zhao, Shuxiang Dong, Zhongqiang Hu, Jinghong Guo, Zhuangde Jiang, Ming Liu (2022) An AC magnetic compass based on magnetoelectric effect integrated with a calibration algorithm. *Sensors and actuators physical*, 347, 113955. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113955
- [31] Z. Chao, X. Zhang, X. Ma, C. Lü, L. Chen, X. Li (2019) Research on a new electronic compass calibration algorithm. *Chinese journal of sensors and actuators*, 32(1), 106-110. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.01.019
- [32] Jiancheng Fang, Hongwei Sun, Juanjuan Cao, Xiao Zhang, Ye Tao (2011) A novel calibration method of magnetic compass based on ellipsoid fitting. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 60(6), 2053-2061. DOI: 10.1109/TIM.2011.2115330
- [33] H. Sun, J. Fang (2009) Error modeling and calibration method of AMR compass. *Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics*, 35(1), 104-107

© Войтасик А. М.

Дата надходження статті до редакції: 09.10.2023

Дата затвердження статті до друку: 16.11.2023