

## АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО МОРСЬКОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЗАДАЧ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ВОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ШЛЯХІВ УКРАЇНИ

**Збруцький О. В.**, д.т.н., професор, професор кафедри систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: zbrutsky@cisavd.kpi.ua, ORCID: 0000-0002-2206-7148;

**Сірівчук А. С.**, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sirivchuka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2927-2600;

**Трибулькевич С. Л.**, старший викладач кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5783-6616.

*Безпека водних шляхів України є важливою задачею сьогодення, особливо увагу слід приділяти наявності підводних потенційно небезпечних об'єктів, у тому числі й вибухових. Пропонується використання безекіпажної самохідної плавучої платформи, яка оснащена ненаселеним прив'язним підводним апаратом для виявлення та ідентифікації таких об'єктів. Використання такої системи надає особливі вимоги до системи автоматичного керування через наявність двох самохідних об'єктів з'єднаних між собою гнучким зв'язком, особливістю якої є необхідність забезпечення плоско-паралельного руху платформи зі збереженням кута ризику.*

*Для забезпечення плоско-паралельного руху пропонується використання рушійно-кермового комплексу, що складається з чотирьох рушіїв, що знаходяться під певним кутом до головної осі симетрії платформи. У роботі представлено закон керування кожного двигуна залежно від визначеного вектора руху, що є однією зі складових тактичного рівня системи автоматичного керування.*

*Запропоновано використання ієрархічної системи автоматичного керування, де особливістю є спільний стратегічний рівень для всієї системи та окремі тактичні та виконавчі рівні для безекіпажної самохідної плавучої платформи та ненаселеного прив'язного підводного апарата.*

**Ключові слова:** безекіпажна самохідна плавуча платформа; ненаселений прив'язний підводний апарат; автоматизація керування рухом; гуманітарне розмінування, підводний потенційно небезпечний об'єкт.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.058-068**

**Вступ.** Забезпечення безпеки мореплавства в Україні є критичною задачею сьогодення. Однією з важливих складових цієї задачі є очищення акваторій від небезпечних об'єктів, особливо підводних, на водних транспортних шляхах України [1]. Внаслідок агресії з боку РФ дане питання постає ще більш гостро, оскільки під водою опиняються також вибухонебезпечні об'єкти, які несуть ще більший рівень загрози, ніж прості заводи. Причому, очищення водних шляхів України від даної загрози пов'язано з ризиком для людей [2]. Процес виявлення та нейтралізації загроз містить декілька етапів [3, 4]. Однією з головних труднощів є складність виявлення підводних об'єктів з поверхні без залучення спеціалізованої техніки, що ускладнює процес виявлення та ідентифікації загроз.

Для підвищення ефективності виявлення та ідентифікації небезпечних навігаційних загроз пропонується використання безекіпажного морського технологічного комплексу у складі самохідної безекіпажної плавучої платформи (СБПП), оснащеної ненаселеним прив'язним підводним апаратом (НППА) (рис. 1).

На СБПП розміщено пост енергетики і керування НППА (ПЕК) та кабельну лебідку (КЛ) з кабель-тросом (КТ), за допомогою якого забезпечується енергоживлення НППА та його інформаційний обмін з ПЕК.

До складу обладнання НППА входять: рушійно-рульовий комплекс (РРК), система навігації та керування, а також начіпне обладнання – пошукові прилади та підводні маніпулятори для операцій з ППНО.

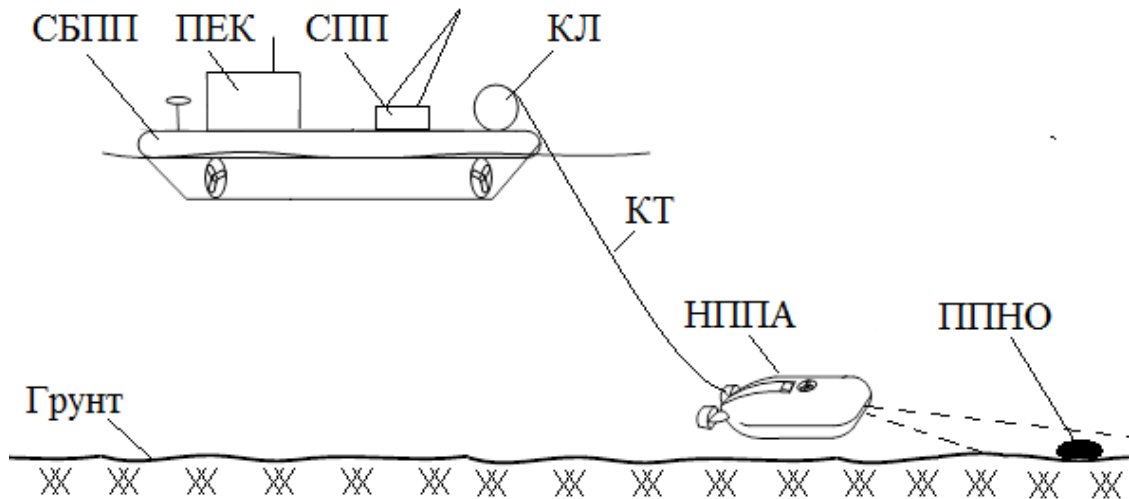


Рисунок 1 – Структура використання безкіпажного морського технологічного комплексу для інспекції водних транспортних шляхів України

Головною задачею такого комплексу є сканування морського або річкового дна водних транспортних шляхів для виявлення потенційних загроз судноплавству. Після виявлення підводного потенційно небезпечного об'єкта (ППНО) з платформи спускається НППА, який забезпечує ідентифікацію виявлених об'єктів та, за необхідністю, їх нейтралізацію.

Таким чином, вирішуються одночасно декілька задач: пошук, ідентифікація та нейтралізація потенційно небезпечних об'єктів. Незважаючи на явні переваги використання такої системи вимагає взаємодію СБПП та НППА на рівні автоматизації їх спільного руху.

**Постановка проблеми.** Використання безкіпажного морського технологічного комплексу у складі двох рухомих об'єктів, зв'язаних між собою гнучким зв'язком (кабель-тросом КТ) утворює нові виклики в розробці системи автоматичного керування такими комплексами.

Особливістю даного комплексу є те, що і СБПП, і НППА мають власні рушії та можуть керувати своїм рухом, але наявність гнучкого зв'язку вимагає організації їх узгодженого просторового руху, оскільки неузгоджений рух СБПП буде створювати великі зовнішні збурення для НППА. Також додатковими вимогами від пошукових приладів є підтримка кута ризику в СБПП. Все це вимагає наявності у СБПП специфічної конструкції рушійно-кермового комплексу (РКК), який забезпечить підтримку куту ризику та плоскопаралельне переміщення СБПП з заданими параметрами швидкості, а також оновлення структури системи автоматичного керування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Використання засобів підводної робототехніки для задач виявлення та нейтралізації ППНО вже мають практичне застосування [2, 4–9]. Для пошуку та ідентифікації ППНО в світі використовуються, як автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) [10] так і НППА, що спускаються з пірса або судна носія [2, 8, 9, 11]. Для змоги розширення спектра виконуваних задач за одне занурення використовуються багатоцільові НППА [12].

При всіх перевагах використання НППА мають обмежений радіус дії, а АНПА не дають змогу керування в режимі реального часу, тому в [13, 14] пропонується використання НППА з радіобуєм, але дана конструкція хоч і має практично необмежений радіус дії, але стикається з проблемою часу автономної роботи та неможливості керування позицією радіобуя, що обмежує його застосування.

Представлена в даній статті безкіпажного морського комплексу має всі переваги НППА з радіобуєм, має значно більший запас енергії, а саморухома надводна частина комплексу забезпечує більшу маневреність.

Наявні конструктивні рішення безекіпажних надводних транспортних засобів здебільшого забезпечують добру маневреність при маршовому русі [15, 16] та деякі з них також системи динамічного позиціонування [17]. Але дані конструкції не передбачають швидкий боковий рух, що є одним з необхідних режимів для роботи СБПП.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є опис технології робіт з гуманітарного розмінування водних транспортних шляхів України з використанням безекіпажного морського технологічного комплексу «Самохідна безекіпажна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат» та розробка структури системи автоматичного керування самохідною безекіпажною плавучою платформою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– обґрунтувати множину основних режимів роботи безекіпажного морського технологічного комплексу та сформувану множину задач автоматичного керування комплексом;

– розробити математичну модель системи керування рухом самохідною безекіпажною плавучою платформою;

– розробити узагальнену структуру системи автоматичного керування безекіпажним морським технологічним комплексом для інспекції водних транспортних шляхів України.

**Виклад основного матеріалу.** Для побудови структури системи керування перш за все необхідно визначити режими роботи СБПП з НППА. Виходячи з задач інспекції водних транспортних шляхів України система має наступні режими роботи:

– перехід у задану точку – перехід від точки старту до точки початку місії або від точки кінця місії до точки підбору системи. Даний режим руху не передбачає вимог до параметрів руху СБПП, НППА в даному режимі знаходиться на борту СБПП;

– траєкторний рух СБПП без спуску НППА – у даному режимі працюють вимірвальні прилади лише СБПП, є необхідність утримання швидкості руху (впливає на точність приладів) та утримання заданого курсу. При русі з боковим зсувом необхідно також забезпечувати лаговий рух для утримання на заданій траєкторії з відповідною орієнтацією;

– утримання СБПП у точці, НППА проводить обстеження об'єкта – в даному режимі СБПП повинен утримуватись у точці для зменшення впливу на НППА через кабель-трос. Оскільки робота такого ПА може бути пов'язана з вибухонебезпечними об'єктами. У таких умовах неконтрольовані зовнішні збурення можуть призвести до втрати НППА. У даному режимі необхідно не тільки утримувати СБПП у заданій точці, але й визначити точку, яка буде оптимальною для роботи ПА (задача оператора);

– спільний рух СБПП та НППА – даний режим може використовуватись для обстеження довгих об'єктів, сканування донної поверхні в умовах, коли засобами СБПП це зробити неможливо тощо.

Таким чином для системи автоматичного керування рухом НППА та СБПП можна виділити три ключові режими роботи: ручний, автоматизований та автоматичний. У ручному режимі роботи всі задачі керування бере на себе оператор (відхиленнями джойстиків керуючих пристроїв задає відповідний сигнал на електроприводи), в автоматизованому – система автоматичного керування бере на себе задачі стабілізації визначених параметрів (такі як курс, швидкість, глибина тощо), які в режимі реального часу передаються від оператора, автоматичний рух – забезпечує взаємну роботу НППА та СБПП при проходженні по заданій траєкторії або до заданої точки, де виявлено ППНО.

Для полегшення побудови систему керування рухом залежно від режиму роботи розділяють на дві підсистеми: для НППА та для СБПП. Режими руху будуються відповідно до стандартних протоколів керування безекіпажними рухомими апаратами [18]. Відмінність та особливості кожного режиму представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис режимів керування ПА та СБПП

№	Режим	НППА	СБПП
1.	Ручний	– ручне керування оператором двигунами РРК (в якості сигналів надходить рівень потужності для кожного двигуна в діапазоні $\pm 1$ ); – ручне керування оператором начіпним обладнанням.	– забезпечує керування двигунами в відносних одиницях, що задається відхиленням рукоятки керування, $j_x$ (відхилення по осі $x$ ) та $j_y$ (відхилення по осі $y$ ) для плоско-паралельного руху та $j_\phi$ (відхилення по осі $z$ , залежно від типу маніпулятора може знаходитись на іншій рукоятці) для повороту; – керування виконавчими механізмами (КЛ, СБПП тощо) проходить у ручному режимі.
2.	Автоматизований	– сигналами керування від оператора є курс, глибина та швидкість маршового руху; – керування іншими механізмами таке ж, як у ручному режимі.	– сигналами керування від оператора є курс та вектор швидкості маршового руху; – керування іншими механізмами таке ж, як у ручному режимі.
3.	Автоматичний	Задаються параметри місії у вигляді масиву значень: – цільові координати (GPS та глибина); – швидкість руху; – курс до точки призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання.	Траекторний рух з вимірювальним обладнанням коли НППА знаходиться на борту. Параметри місії задаються масивом значень: – цільові координати (GPS та глибина); – швидкість руху; – курс у точці призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання.  Утримання в заданій точці (НППА ідентифікує об'єкт) параметри місії: – цільові координати (GPS та глибина); – курс у точці призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання.  Слідування за апаратом по принципу алгоритму рою, де НППА є ведучим (необхідна система донної навігації).

Виходячи з вищеписаних режимів робіт до системи керування та навігації СБПП ставляться наступні вимоги:

- забезпечення можливості плоско-паралельного переміщення платформи;
- наявність системи визначення поточного положення (GPS) та переміщення (доплеровий лаг);
- наявність підводного GPS для визначення відносного положення між НППА та СБПП;
- також для безпеки судноплавства необхідне використання ECDIS [19].

Для автоматизації руху СБПП пропонується створення каскадної системи керування, основними модулями якої є задатчик сигналу (ЗС), регулятор швидкості (РШ), регулятор курсу (РК) та задатчик швидкості (ЗШ). У даній структурі керування рухом прослідковується чітка ієрархія, де ручний режим, крім безпосереднього відпрацювання сигналів від оператора, забезпечує відпрацювання сигналів керування автоматизованого режиму, а автоматизований – автоматичного, що забезпечує модульність системи керування рухом СБПП (рис. 2).

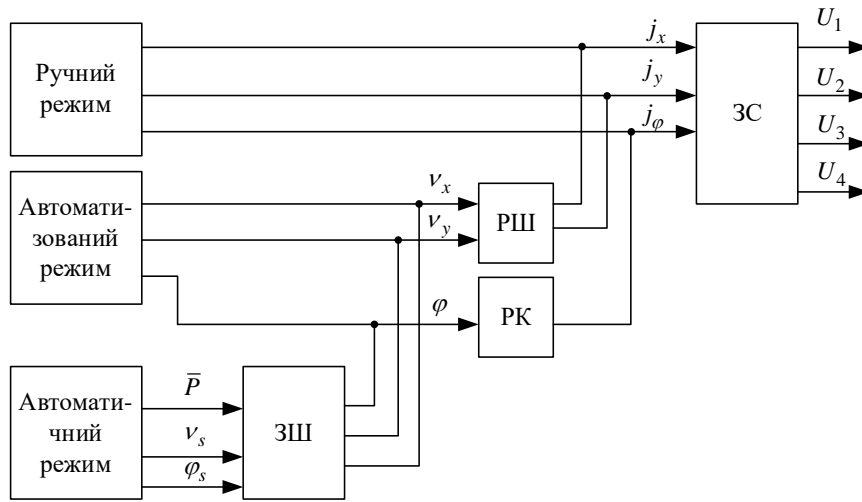


Рисунок 2 – Система керування рухом СБПП

Задатчик сигналу ЗС – це модуль, який перетворює сигнали керування, що поступають від оператора або системи автоматизованого руху, в окремі сигнали кожного двигуна. Математичний опис даного модулю залежить від РКК, який використовується в СБПП. Для забезпечення плоско-паралельного руху СБПП найбільш ефективною структурою РКК є структура, що складається з 4 двигунів, які встановлені під кутом  $\alpha$  по відношенню до основної симетрії осей СБПП (рис. 3) [20].

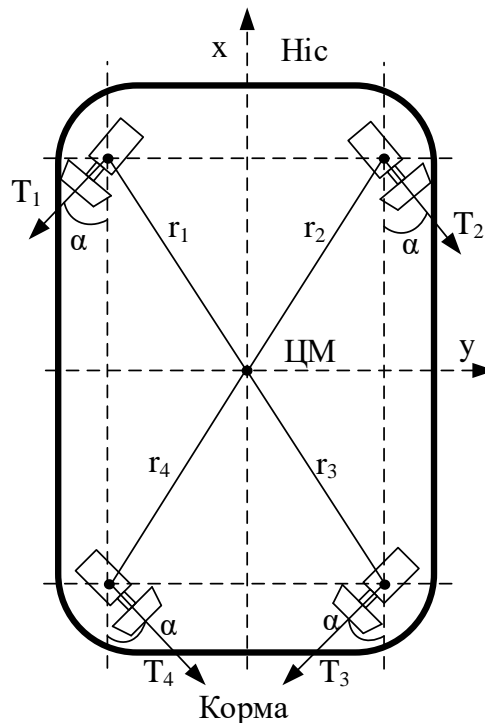


Рисунок 3 – Структура РКК СБПП

Для реалізації модуля ЗС необхідно визначити залежність вихідних параметрів  $U_n$  (де  $n$  – номер електрорушійного пристрою) від вхідних параметрів  $j_x, j_y$  та  $j_\phi$  з урахуванням особливостей конструкції РКК. Для універсальності алгоритму вхідні та вихідні значення повинні бути представлені у відносних одиницях (у діапазоні  $[-1; 1]$ ). Із рис. 3 видно, що  $T_1 \parallel T_3$  та  $T_2 \parallel T_4$ , отже введемо додаткові розрахункові значення – величини сигналу керування ЕРП для забезпечення плоско-паралельного руху  $p_{x1}$  (ЕРП 1 та 3) та  $p_{x2}$  (ЕРП 2 та 4). Таким чином сума  $p_{x1}$  та  $p_{x2}$  буде забезпечувати маршовий рух, а їх різниця – лаговий:

$$\begin{cases} j_x = p_{x1} + p_{x2} \\ j_y = p_{x1} - p_{x2} \end{cases} \quad (1)$$

Розв'язавши дану систему рівнянь ми отримуємо частку сигналу керування для окремого двигуна ( $p_{x1}$  та  $p_{x2}$ ), яка буде відповідати за плоско-паралельний рух.

Для забезпечення повороту (без зміщення СБПП) всі двигуни повинні давати однакову інтенсивність упору, але  $T_2, T_3$  повинні мати додатне значення, а  $T_1, T_4$  – від'ємне. Дана частка упору буде задаватись значенням  $j_\varphi$ .

Додатковими обмеженнями закону керування рухом є:

- результуючий сигнал керування не повинен перевищувати 1;
- при перевищенні сигналу керування пріоритет надається сигналу керування поворотом.

Враховуючи дані обмеження та спираючись на (1) сигнал керування для кожного двигуна буде розраховано за формулою:

$$\begin{aligned} U_1 &= \begin{cases} -j_\varphi + p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| \leq 1 \\ -j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| > 1 \end{cases} \\ U_2 &= \begin{cases} j_\varphi + p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| \leq 1 \\ j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| > 1 \end{cases} \\ U_3 &= \begin{cases} j_\varphi + p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| \leq 1 \\ j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| > 1 \end{cases} \\ U_4 &= \begin{cases} -j_\varphi + p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| \leq 1 \\ -j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Регулятори РШ та РК забезпечують стабілізацію швидкості та курсу СБПП, їх реалізація може бути представлена у вигляді адаптивних ПІД регуляторів.

Задатчик сигналу ЗШ обчислює відстань  $R$  та курс  $\varphi_R$  до заданих координат місії  $\bar{P}$ . Математичний опис даних розрахунків представлений у [21]. Якщо додаткові параметри руху, які потрібно забезпечувати для нормального функціонування вимірювального обладнання

( $v_s, \varphi_s$ ), не задані (приймають значення -1), то СБПП йде маршовим рухом у сторону точки на максимальній швидкості  $v_{\max}$  (виключення становить ситуація, коли СБПП підходить до заданої точки). Таким чином, вихідні параметри ЗШ обчислюються за допомогою наступних відношень

$$\begin{aligned} v_x &= \begin{cases} v_s \cdot \cos \varphi_p, \text{ якщо } v_x \neq -1 \\ f(R) \text{ якщо } v_x = -1 \end{cases} \\ v_y &= \begin{cases} v_s \cdot \sin \varphi_p, \text{ якщо } v_x \neq -1 \\ 0 \text{ якщо } v_x = -1 \end{cases} \\ \varphi &= \begin{cases} \varphi_x, \text{ якщо } \varphi_x \neq -1 \\ \varphi_p, \text{ якщо } \varphi_x = -1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

де  $f(R)$  – експериментальна залежність швидкості руху СБПП від відстані до цілі, наприклад:

$$v_x = v_{\max} \frac{R}{\sqrt{a + R^2}}; \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт крутизни сигмоїди.

Вибір функції  $f(R)$  та її коефіцієнтів підбирається експериментальним шляхом залежно від динамічних характеристик СБПП.

Для ефективного виконання місії пропонується використання трирівневої ієрархічної структури системи керування з роздільними тактичним та виконавчими рівнями (рис. 4).

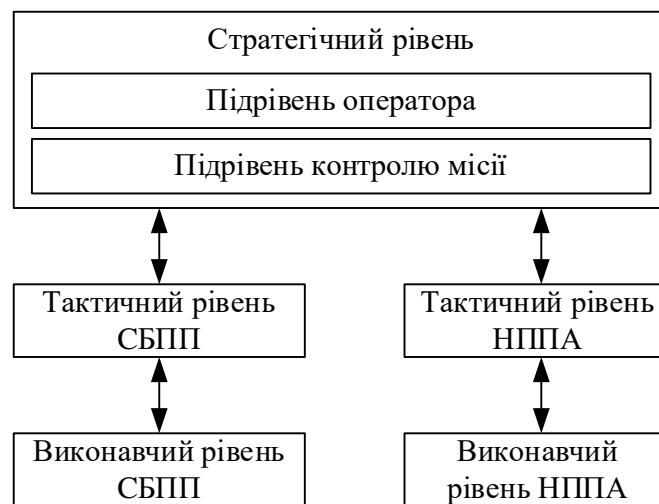


Рисунок 4 – Загальна структура системи керування «Безекипажна самохідна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат»

Верхнім спільним рівнем є стратегічний рівень, який забезпечує взаємодію оператора з комплексом СБПП-НППА, а також взаємну роботу СБПП та НППА.

Даний рівень можна поділити на два підрівні: підрівень оператора та підрівень контролю місії. Підрівень оператора забезпечує ручне та автоматизоване керування СБПП та НППА, надає інструменти для постановки місії в автоматичному режимі керування.

Підрівень контролю місії містить задачі постановки сигналів керування для тактичного рівня відповідно від поставленого завдання. У даному режимі закладені всі точки траєкторного руху та визначається поточна точка, до якої треба рухатись, або режим стабілізації в даній точці. При цьому масиви точок для СБПП та НППА можуть відрізнятись, але не більше ніж це дозволяє кабель-трос. На даному рівні контролюється взаємне розташування СБПП та НППА та проводяться корективи для режиму руху СБПП. Пріоритет за положенням віддається підводному апарату, оскільки більшість кінцевих робочих інструментів знаходяться саме на НППА.

Тактичний рівень перетворює задачі місії в зрозумілі команди для виконавчих механізмів. Стратегічний рівень надає окремі задачі для СБПП та НППА, тому тактичний рівень є окремим для даних об'єктів.

Однією з головних задач тактичного рівня є забезпечення автоматичного руху кожного рухомого об'єкта. Апаратно тактичний рівень, зазвичай, реалізований на бортовому комп'ютері керованого об'єкта. Вихідними параметрами тактичного рівня є рівень сигналів керування на основні виконавчі механізми (електроприводи поворотних рулів та крил, електроприводи маніпуляторів, електроприводи РКК). Вхідними параметрами є поточні задачі місії від стратегічного рівня та зворотний зв'язок з сенсорів виконавчого рівня.

Виконавчий рівень перетворює, отримані сигнали керування, з відносних одиниць у сигнали для драйверів виконавчих пристроїв з використанням перетворювачів інтерфейсів та підтримкою протоколів обміну залежно від пристроїв, що використовуються. Також на цьому рівні виконуються перетворення первинних даних від датчиків у параметри, які використовуються на тактичному рівні. На відміну від інших рівнів системи виконавчий рівень повністю залежить від обладнання, яке встановлене на СБПП та НППА.

**Основні результати та їх обговорення.** Отриманні результати дослідження закладають теоретичну основу для розробки нової системи моніторингу водних транспортних шляхів України та засобів гуманітарного розмінування. Представлена СБПП – НППА є багатофункціональною системою з можливістю тривалого часу автономної роботи.

У роботі представлено загальні режими руху, які повинна забезпечувати функціонування системи та запропоновано конструкцію рушійно-кермового комплексу та запропоновано закони керування плоско-паралельним рухом запропонованої системи.

**Висновки.** Представлений самохідний безекіпажний морський комплекс «Самохідна безекіпажна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат» дає змогу підвищити ефективність виконання робіт з гуманітарного розмінування на водних транспортних шляхах України. Представлена платформа вимагає більшої кількості режимів автоматичного керування в порівнянні з іншими плавучими засобами робототехніки. Крім режиму стабілізації в точці, що притаманний більшості плавучих платформ, додаються режими слідкування за ненаселеним прив'язним підводним апаратом та режим траекторного руху з незмінним кутом ризику.

Запропонована структурна система керування забезпечує взаємодію між самохідною безекіпажною платформою та ненаселеним прив'язним підводним апаратом та стратегічному рівні, де визначається та задається їх взаємне розташування і на основі цих даних передаються сигнали керування для тактичного рівня кожного з них.

Сформульовані режими руху та запропонована структура системи керування закладають теоретичне підґрунтя для впровадження роботизованих технологій проведення робіт з забезпечення безпеки судноплавства в Україні.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження будуть присвячені деталізації роботи стратегічного рівня представленої структури системи керування. У даному рівні планується впровадження систем автоматичного виявлення та ідентифікації підводних потенційних об'єктів методами комп'ютерного зору та автоматичне реагування на виявлення таких об'єктів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про внутрішній водний транспорт. Закон України № 4017-IX від 10.10.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text> (дата звернення: 26.12.2024).
2. ДСНС показали обладнання водолазів і як здійснюється підводне розмінування: Міністерство внутрішніх справ України <https://mvs.gov.ua/news/dsns-pokazali-obladnannia-vodolaziv-i-iak-zdiisniujetsia-pidvodne-rozminuvannia-video>.
3. Блінцов В. С., Надточий А. В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення = Humanitarian demining of shallow water areas: technologies and robotic support: *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2024. № 1 (18). С. 4–10.
4. A Guide to survey and clearance of Underwater Explosive Ordnance. Geneva, April, 2016. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323031189.pdf>.
5. Jose M. Giron-Sierra, Fernando Pereda, Hector Garcia de Marina, Santiago Cifuentes, Developing an Autonomous Surface Ship for Sea Demining: First Steps, IFAC Proceedings Volumes, Volume 43, Issue 20, 2010, 91–96 p.
6. Blintsov, Volodymyr, Maksym Hrytsaienko. Improvement of the Management of Material and Technical Resources of Water Cleaning Projects From Explosive Objects. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 6, no. 2, 2016, pp. 51–56, <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86768>.
7. Соловійов І. І., Стрілець В. М. Проблемні питання виконання робіт з підводного розмінування. Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи : наук.-техн. зб. Матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф., 02–03 черв. 2020 р. Київ: КПІ, ННДІ ПБтаОП, 2020. С. 225–231. URL: [http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Vochkovskyi%20A.\\_Sapozhnikova%20N..pdf](http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Vochkovskyi%20A._Sapozhnikova%20N..pdf).
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. URL: <https://www.gichd.org/>.
9. Блінцов В. С., Грицаєнко М. Г., Поступальський М. І. Роботизовані технології пошуку та обстеження підводних потенційно небезпечних об'єктів: успішні практики та напрямки подальшого впровадження. «Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки



України»: *Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції*. Миколаїв : Видавець Торубара В. В., 2020. 49–51 с.

10. Russell B. Wynn, Veerle A. I. Huvenne, Timothy P. Le Bas, Bramley J. Murton, Douglas P. Connelly, Brian J. Bett, Henry A. Ruhl, Kirsty J. Morris, Jeffrey Peakall, Daniel R. Parsons, Esther J. Sumner, Stephen E. Darby, Robert M. Dorrell, James E. Hunt, *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, Marine Geology, Volume 352, 2014, 451–468 p.*

11. Hrytsaienko, M. Development of the information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects. *Technology Audit and Production Reserves, 2017. 2(2(40)), 57–62. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129208>.*

12. Attia, Youssef & Tawakol, Amr & Kohel, Karim & Ahmed, Adham & Abdellatif Hamed IBRAHIM, Ahmed & Abdelsalam, Ibrahim. Development of a Smart Multipurpose Underwater Vehicle for Subsea Operations: Navigation and Objects detection using Artificial Intelligence Techniques. *IUGRC International Undergraduate Research Conference. Volume 5, Issue 5, 2021.*

13. Блінцов В. С., Сірвчук А. С., Надточій А. В., Надточій В. А. Автоматизація керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм: монографія, Миколаїв: Ліон, 2022. 196 с.

14. Blintsov Volodymyr, Maidaniuk Pavlo, Sirivchuk Andrii Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. Number 3. P. 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>.

15. Burdziakowski, Paweł & Stateczny, Andrzej. Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research. 2019. 26. 30–39. [10.2478/pomr-2019-0004](https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004).*

16. Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Andrii Ben, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices International. Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence”. Springer International Publishing. 2021. 266–281 p.

17. Zinchenko, s & Ben, A. & Nosov, Pavlo & Mateichuk, V. & Grosheva, O. & Popovych, Ihor. The vessel movement optimisation with excessive control. *Bulletin of the Karaganda University Physics Series. 2020. 99. 86–96. [10.31489/2020Ph3/86-96](https://doi.org/10.31489/2020Ph3/86-96).*

18. MAVLINK Common Message Set URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>

19. ECDIS Procedures Guide – 2024–2025 Edition. Witherbys, 2024. 312 p. URL: <https://shop.witherbys.com/ecdis-procedures-guide-2024-2025-edition/>.

20. Блінцов В. С., Войтасик А. М. Сучасні задачі автоматичного керування самохідною прив'язною підводною вантажною системою. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2017. № 3. С. 49–55. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk\\_2017\\_3\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2017_3_8).*

21. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. URL: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

## REFERENCES

1. Pro vnutrishnii vodnyi transport [On inland water transport]. *Zakon Ukrainy [Law of Ukraine] № 4017-IX vid 10.10.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text> (data zvernennia: 26.12.2024).*

2. DSNS pokazaly obladnannia vodolaziv i yak zdiisniuietsia pidvodne rozminuvannia: Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy [The State Emergency Service showed divers' equipment and how underwater demining is carried out: Ministry of Internal Affairs of Ukraine] <https://mvs.gov.ua/news/dsns-pokazali-obladnannia-vodolaziv-i-iak-zdiisniujetsia-pidvodne-rozminuvannia-video>.

3. Blintsov, V. S., Nadtochy, A. V. (2024). Humanitarne rozminuvannya milkovodnykh akvatorii: tekhnologii ta robototekhnichne zabezpechennia [Humanitarian demining of shallow water areas: technologies and robotic support] *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. № 1 (18). S. 4–10.
4. A Guide to survey and clearance of Underwater Explosive Ordnance (2016). Geneva, April. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323031189.pdf>.
5. Jose M. Giron-Sierra, Fernando Pereda, Hector Garcia de Marina, Santiago Cifuentes, (2010). Developing an Autonomous Surface Ship for Sea Demining: First Steps, IFAC Proceedings Volumes, Volume 43, Issue 20, 91–96 p.
6. Blintsov, Volodymyr, Maksym Hrytsaienko (2016). Improvement of the Management of Material and Technical Resources of Water Cleaning Projects From Explosive Objects. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 6, no. 2, pp. 51–56, <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86768>.
7. Soloviov, I. I., Ctrilets, V. M. (2020). Problemni pytannia vykonannia robot z pidvodnoho rozminuvannya [Problematic issues of underwater mine clearance work]. *Enerhozberezhennia ta promyslova bezpeka: vyklyky ta perspektyvy : nauk.-tekhn. zb. Materialiv III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Energy saving and industrial safety: challenges and prospects: scientific and technical collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference]*, 02–03 cherv. 2020 r. Kyiv: KPI, NNDI PBtaOP, S. 225–231. URL: [http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovskyi%20A.\\_Sapozhnikova%20N..pdf](http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovskyi%20A._Sapozhnikova%20N..pdf).
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. URL: <https://www.gichd.org/>.
9. Blintsov, V. S., Hrytsaienko, M. H., Postupalskyi, M. I. (2020). Robotyzovani tekhnologii poshuku ta obstezhennia pidvodnykh potentsiino nebezpechnykh ob'ektiv: uspishni praktyky ta napriamky podalshoho vprovadzhennia. [Robotic technologies for searching and surveying underwater potentially dangerous objects: successful practices and directions for further implementation.] «Aktualni pytannia tekhnogenoi ta tsyvilnoi bezpeky Ukrainy» : Materialy II Vseukrainskoi naukovoikonferentsii [Current issues of technogenic and civil security of Ukraine": Materials of the II All-Ukrainian scientific conference]. Mykolaiv : Vydavets Torubara V., 49–51 s.
10. Russell B. Wynn, Veerle A. I. Huvenne, Timothy P. Le Bas, Bramley J. Murton, Douglas P. Connelly, Brian J. Bett, Henry A. Ruhl, Kirsty J. Morris, Jeffrey Peakall, Daniel R. Parsons, Esther J. Sumner, Stephen E. Darby, Robert M. Dorrell, James E. Hunt (2014). Autonomous Underwater Vehicles : Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, *Marine Geology*, Volume 352, 451–468 p.
11. Hrytsaienko, M. (2017). Development of the information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(40)), 57–62. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129208>.
12. Attia, Youssef & Tawakol, Amr & Kohel, Karim & Ahmed, Adham & Abdellatif Hamed IBRAHIM, Ahmed & Abdelsalam, Ibrahim.(2021) Development of a Smart Multipurpose Underwater Vehicle for Subsea Operations: Navigation and Objects detection using Artificial Intelligence Techniques. IUGRC International Undergraduate Research Conference. Volume 5, Issue 5.
13. Blintsov, V. S., Sirivchuk, A. S., Nadtochy, A. V., Nadtochii, V. A. (2022). Avtomatyzatsiia keruvannia avtonomnym nenaselenym pidvodnym aparatom z radiobuim: monohrafiia [Automation of control of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio beacon], Mykolaiv: Ilion, 196 p.
14. Blintsov Volodymyr, Maidaniuk Pavlo, Sirivchuk Andrii (2019). Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», Number 3. P. 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>.
15. Burdziakowski, Paweł & Stateczny, Andrzej (2019). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*. 26. 30–39. 10.2478/pomr-2019-0004.

16. Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Andrii Ben, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi (2021) Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices International. Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence”. Springer International Publishing. 266–281 p.

17. Zinchenko, s & Ben, A. & Nosov, Pavlo & Mateichuk, V. & Grosheva, O. & Popovych, Ihor (2020). The vessel movement optimisation with excessive control. Bulletin of the Karaganda University Physics Series. 99. 86–96. 10.31489/2020Ph3/86-96.

18. MAVLINK Common Message Set URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>

19. ECDIS Procedures Guide – 2024–2025 Edition. Witherbys, 2024. 312 p. URL: <https://shop.witherbys.com/ecdis-procedures-guide-2024-2025-edition/>.

20. Blintsov, V. S., Voitasyk, A. M. (2017). Suchasni zadachi avtomatychnoho keruvannia samokhidnoiu pryv'iaznoiu pidvodnoiu vantazhnoiu systemoio [Modern problems of automatic control of self-propelled moored underwater cargo system.]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia [Collection of scientific papers of the National University of Shipbuilding]. № 3. S. 49–55. – Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk\\_2017\\_3\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2017_3_8).

21. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. URL: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

**Zbrutsky O. V., Sirivchuk A. S., Trybulkevich S. L. AUTOMATION OF CONTROL OF UNMANNED MARINE TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR THE TASK OF INSPECTION OF WATERWAYS OF UKRAINE**

*The article considers the issue of increasing the efficiency of searching for and identifying dangerous underwater navigation threats by using an unmanned marine technological complex. The relevance of the study is due to the need to ensure the safety of navigation in the territorial waters of Ukraine. The proposed technological complex includes a self-propelled unmanned floating platform and an uninhabited moored underwater vehicle placed on it, its power and control post, as well as a launching and lifting device and a cable winch with a cable tow. The purpose of the work is to substantiate the control tasks for automating the movement of such a complex and synthesize the generalized structure of the automatic control system for this complex. To achieve the set goal, the work reviews modern technologies for detecting and neutralizing underwater potentially dangerous objects, justifies the composition of the equipment of the unmanned marine technological complex and describes a set of basic modes of its operation, and formulates a set of tasks for automatic control of the complex. As a result of the research, a generalized structure of the automatic control system of an unmanned marine technological complex for the inspection of waterways of Ukraine has been developed. To ensure the plane-parallel movement of a self-propelled unmanned floating platform, it is proposed to use a propulsion and steering complex consisting of four engines located at a certain angle to the main axis of symmetry of the platform. The work presents the control law of each electric drive of the platform engine depending on the specified motion vector. The use of a hierarchical automatic control system is proposed, the feature of which is a general strategic level for the entire system and separate tactical and executive levels for the unmanned self-propelled floating platform and the uninhabited moored underwater vehicle. The obtained research results lay the theoretical foundation for the development of a new system for monitoring waterways of Ukraine and means of humanitarian demining of these water areas. The proposed self-propelled unmanned marine complex will make it possible to increase the efficiency of humanitarian demining work on Ukrainian waterways.*

**Key words:** *unmanned self-propelled floating platform; remotely operated underwater vehicle; traffic control automation; humanitarian demining, underwater potentially dangerous object.*

© Збруцький О. В., Сіривчук А. С., Трибулькевич С. Л.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2024