

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/53>**Кулік А.С.**

Національний авіаційний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Надточий А.В.**

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Буруніна Ж.Ю.**

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## **ЗАДАЧІ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОТИМІННИМ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ**

*Розглядаються основні задачі, що виникають при розробці систем автоматичного керування протимінним безекіпажним надводним судном, яке призначене для гуманітарного розмінування акваторій держави. Показана необхідність повної автоматизації процесів керування просторовим рухом самого протимінного судна та автоматизації процесів керування його корисним вантажем – мінопошуковими системами та підводними й авіаційними засобами знищення морських мін. Показана роль математичного моделювання та новітніх комп'ютерних технологій у розробці сучасних систем автоматичного керування такими об'єктами. Розроблено множину математичних моделей основних складових протимінного безекіпажного надводного судна, його корисного вантажу та систем автоматичного керування ними. Запропоновані підходи спрямовані на забезпечення високої точності та надійності функціонування протимінних безекіпажних надводних суден у складних морських умовах експлуатації.*

*Мета.* Розробка множини математичних моделей функціонування протимінного безекіпажного надводного судна та множини математичних моделей функціонування його корисного вантажу, а також множини математичних моделей систем керування цими об'єктами як науково-методологічного підґрунтя для розробки та перевірки ефективності системи автоматичного керування протимінного безекіпажного надводного судна.

*Методика.* При дослідженні використано методологію аналізу науково-технічної літератури та принцип системного підходу. Об'єктом дослідження є процес гуманітарного розмінування територіального моря України, прилеглої зони України та внутрішніх вод України. Предметом дослідження є процес і результат формування множини математичних моделей функціонування протимінного безекіпажного надводного судна та множини математичних моделей функціонування його корисного вантажу.

*Результати.* З позицій системного підходу сформульовано повний перелік етапів роботизованого розмінування акваторій держави на основі застосування спеціалізованого протимінного безекіпажного надводного судна-робота, який оснащено приладами для пошук, ідентифікації та картографування морських і річкових мін та засобами підводної та авіаційної робототехніки для їх нейтралізації. На основі отриманих етапів робіт сформовано задачі автоматизації робіт з гуманітарного розмінування акваторій як складових роботизованих технологій очищення територіальних вод України від мінної загрози. Описано основні режими роботи протимінного безекіпажного надводного судна як носія протимінного робототехнічного обладнання та сформульовано задачі розробки окремих підсистем системи автоматичного керування таким судном. Для кожного операційного режиму роботи протимінного безекіпажного надводного судна розроблено множину математичних моделей його функціонування в умовах дії зовнішніх збурень та множину математичних моделей функціонування його корисного вантажу, а також множину математичних моделей систем керування цими об'єктами. Це утворює науково-методологічне підґрунтя для розробки та перевірки ефективності системи автоматичного керування протимінного безекіпажного надводного судна із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій проектування нової техніки.

*Наукова новизна.* Отримана множина етапів роботизованого гуманітарного розмінування акваторій та режими функціонування протимінного безекіпажного надводного судна у сукупності з роз-

робленою множиною математичних моделей функціонування цих об'єктів та їх систем автоматичного керування дають змогу залучати високопродуктивні комп'ютерні технології для синтезу систем автоматичного керування протимінної морської робототехніки.

*Практична значимість.* Отримана множина математичних моделей функціонування протимінного безекіпажного надводного катера та його бортових засобів виявлення і знешкодження мін дасть змогу підвищити продуктивність та якість проектних робіт по створенню систем автоматичного керування новостворюваними засобами морської робототехніки на стадії їх дослідницького проектування.

**Ключові слова:** протимінне безекіпажне надводне судно, система автоматичного керування, математична модель.

**Постановка проблеми.** Морські міни є однією з найнебезпечніших форм зброї, що застосовується під час військових конфліктів. Вони здатні заблокувати важливі морські шляхи, завдати значних економічних і людських втрат, а також залишатися небезпечними протягом десятиліть після закінчення бойових дій.

Гуманітарне розмінування акваторій – це комплекс заходів мирного часу держави, спрямованих на виявлення, знешкодження та утилізацію вибухонебезпечних предметів у морських і річкових водах з метою забезпечення безпеки судноплавства, рибальства, екології та економічної діяльності. Гуманітарне розмінування акваторій є складною і небезпечною операцією, яка вимагає від персоналу високого рівня точності, ефективності та безпеки. Очевидно, що традиційні методи гуманітарного розмінування, що включають вручну виконувани операції, часто виявляються малопродуктивними, небезпечними та ресурсовитратними.

Протимінні безекіпажні надводні судна (БНС) мають низку переваг перед традиційними водолазними технологіями гуманітарного розмінування акваторій, серед яких зменшення людського фактору, підвищена ефективність і безпека операцій, а також можливість виконання завдань у складних та небезпечних умовах. Саме тому використання протимінних БНС стає важливим кроком до підвищення ефективності та безпеки таких операцій [1, 2]. Однією з ключових вимог до створення таких суден є вимога розробки досконалих систем автоматичного керування (САК) БНС, причому, такі САК мають забезпечувати повний цикл виконання морської протимінної місії від керування рухом судна і до застосування протимінного обладнання.

У зв'язку з цим розробка систем автоматичного керування протимінним БНС являє собою актуальну прикладну наукову задачу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що в останні роки науковці та морські інженери при-

діляють протимінним БНС значну увагу. Але опубліковані дослідження здебільшого стосуються загальних принципів побудови протимінних БНС або мінопошукових систем.

Так, у матеріалах [3, 4] надано інформацію про універсальний протимінний безекіпажний катер фірми Exail «Inspector 125», призначений для виявлення та знешкодження мін за допомогою набору підводних дронів, забезпечуючи при цьому безпеку персоналу. До особливостей катера автори відносять високу витривалість і стабільність роботи, наявність декількох комбінацій корисного навантаження та комплексний набір датчиків для підводного та надводного моніторингу. Проте, відомості про побудову САК катером у матеріалі не наводяться.

У матеріалі [5] розглядається БНС протимінної оборони, призначений для виконання довготривалих місій, який підтримує використання широкого спектру мінопошукового обладнання. Судно може виконувати гідроакустичний пошук мін та їх траєкторії. До особливостей корисного навантаження БНС відноситься наявність двох гідролокаторів бокового огляду, сонара для заповнення проміжків і гідролокатора переднього огляду та можливість одночасного виявлення, локалізації та класифікації донних та якірних мін. Однак, у наведеному матеріалі опис принципів побудови та структури САК судном не наводиться.

У роботі [6] розглядаються загальні питання застосування протимінних БНС як складової загальновійськової операції для забезпечення безпечної висадки морського десанту. Але задачі автоматичного керування просторовим рухом БНС вгорі не розглядає.

У дослідженні [7] розглядаються проблемні питання концептуального проектування військового БНС, однак, питанням розробки САК БНС автори не розглядають.

Важливе дослідження виконано автором публікації [8], у якому розглядаються результати аналізу основних небезпек та проблем, які можуть бути спричинені технічними відмовами та враз-

лівістю БНС перед аварійними ситуаціями, які можуть виникнути внаслідок використання автономних суден. Однак, питання побудови САК такими суднами автор не розглядає.

Низка досліджень виконана у напрямку вдосконалення та підвищення ефективності, власне, мінопошукових систем. Так, у роботі [9] розглядається система протимінного БНС, яка виявляє та підриває акустичні та магнітні міни на основі використання технології MAGNUSS (Magnetic and Acoustic Generation Next Unmanned Superconducting Sweep). Однак, питання автоматичного керування БНС залишилися поза увагою авторів дослідження.

У публікації [10] викладено ідею розробки вдосконаленого корисного вантажу протимінного БНС, що складається з високотемпературного надпровідного магнітного джерела з вдосконалим акустичним генератором для пошуку і знешкодження морських мін. Проте, відомості про аналіз і синтез САК протимінним БНС у публікації відсутні.

Особливістю розробки САК протимінного БНС є необхідність повної автоматизації процесів керування просторовим рухом, власне, самого судна та автоматизації процесів керування його корисним вантажем – мінопошуковими системами та системами знищення морських мін. У зв'язку з високою наукоємністю синтезу систем керування такими об'єктами та складністю проведення їх натурних випробувань пропонується розробку систем автоматичного керування протимінних БНС виконувати на основі залучення імерсивних технологій [11, 12]. Складність такого прикладного науково-технічного завдання полягає у відсутності достовірних математичних моделей процесів функціонування БНС та його корисного вантажу як твердих тіл, які виконують керований просторовий рух у потоці води в умовах дії зовнішніх збурень, а також у відсутності математичних моделей функціонування систем автоматичного керування такими об'єктами. Такі моделі є невід'ємною частиною процесу дослідження ефективності синтезованих САК протимінного БНС.

Таким чином, попри наявність глибоких досліджень, власне, проблем проектування та технологій застосування протимінних БНС питання розробки їх систем автоматичного керування у науково-технічній літературі висвітлені недостатньо.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка множини математичних моделей функціо-

нування протимінного БНС та множини математичних моделей функціонування його корисного вантажу, а також множини математичних моделей систем керування цими об'єктами як науково-методологічного підґрунтя для розробки та перевірки ефективності системи автоматичного керування протимінного БНС.

При дослідженні використано методологію аналізу науково-технічної літератури та принцип системного підходу. Об'єктом дослідження є процес гуманітарного розмінування територіального моря України, прилеглої зони України та внутрішніх вод України. Предметом дослідження є процес і результат формування множини математичних моделей функціонування протимінного БНС та множини математичних моделей функціонування його корисного вантажу

**Виклад основного матеріалу.** Роботи по гуманітарному розмінуванню мають виконуватись на всіх акваторіях держави – у територіальному морі України [13], у прилеглої зони України [14] та у внутрішніх водах України [13]. На цей час існує низка нормативних документів та наукових досліджень, які стосуються гуманітарного розмінування акваторій [15-18]. Але вони переважно регламентують традиційні (водолазні) технології розмінування і передбачають застосування мінопошукових пристроїв лише як джерела первинної інформації про мінну небезпеку [19].

Тому, виходячи з принципів системного підходу [20] розглянемо завдання роботизованого (безлюдного) гуманітарного розмінування акваторій держави як єдиний процес  $T_p$ , що складається з наступних взаємопов'язаних етапів [21]:

етап  $T_{p-SIM}$  роботизованого пошуку, ідентифікації та картографування підводних потенційно небезпечних об'єктів (ППНО); тут на основі використання гідролокаторів, магнітометрів та прив'язних (буксируваних чи самохідних) відеосистем БНС та/або його корисного вантажу (підводних роботів) створюється детальна цифрова карта підводної обстановки на обстеженій акваторії, виконується виокремлення мін від природних підводних об'єктів (ідентифікація ППНО);

етап  $T_{p-N}$  нейтралізації ППНО на місці їх виявлення (підрив на місці чи укривання захисною конструкцією); тут застосовується корисний вантаж БНС – дистанційно керовані підводні апарати або автономні підводні дрони, які доставляють до ППНО підривні заряди та ініціюють їх спрацювання;

етап  $T_{p-UT}$  підводного транспортування ППНО до місця тривалого та безпечного підводного збе-

рігання  $T_{P-UT}$ ; цей етап виконується за допомогою корисного вантажу БНС – підводних роботів-транспортувальників спеціальної конструкції, на який автоматично або дистанційно під керуванням оператора виконується завантаження ППНО та їх транспортування;

етап  $T_{P-ST}$  надводного транспортування ППНО на берег для подальшого транспортування і знищення на спеціальному полігоні  $T_{P-ST}$ ; цей етап виконується аналогічно етапу  $T_{P-UT}$ ;

етап  $T_{P-D}$  документального роботизованого обстеження очищеної акваторії для її безпечної подальшої експлуатації; тут за допомогою підводних роботів виконується перевірка акваторії після операції для підтвердження успішності завершення операції гуманітарного розмінування акваторії.

Виходячи з досвіду проведення протимінних операцій в Україні [22] доповнимо наведену вище множину етапів розмінування ще двома важливими етапами:

етап  $T_{P-M}$  роботизованого маркування виявлених та ідентифікованих ППНО, яке виконується у випадках, коли оперативну нейтралізацію (знищення на місці чи транспортування у безпечне місце) виконати неможливо чи недоцільно (наприклад, при розташуванні ППНО безпосередньо біля важливих об'єктів критичної інфраструктури);

етап  $T_{P-I}$  роботизованої періодичної інспекції акваторії, де виявлено та промарковано ППНО, та технічного стану самого об'єкту з метою недопущенні доступу до нього зловмисників.

Тоді повний перелік етапів роботизованого гуманітарного розмінування акваторій держави можна представити наступною множиною:

$$T_P = \{T_{P-SIM}; T_{P-N}; T_{P-UT}; T_{P-ST}; T_{P-D}; T_{P-M}; T_{P-I}\}. \quad (1)$$

Розглянемо тепер основні вимоги до математичних моделей процесів функціонування БНС як твердого тіла, яке виконує керований просторовий рух в умовах дії зовнішніх збурень. Введемо у розгляд наступні основні операційні режими  $R$  роботи протимінного БНС, які вимагають розробки окремих підсистем САК такого судна:

режим  $R_S$  руху судна пошуковими галсами з включеною мінопошуковою апаратурою;

режим  $R_{P-Drop}$  руху судна у режимі спуску на воду підводного корисного вантажу – мінопошукового буксируваного гідролокатора (МБГ), протимінних прив'язних ненаселених буксируваного (ПБА) та/чи самохідного підводного апарата (ПСА), протимінного автономного ненаселеного підводного апарата (ППА);

режим  $R_{P-Job1}$  руху судна при роботі підводного корисного вантажу прив'язного типу (МБГ, ПБА та ПСА) при виконанні ними пошукових протимінних операцій;

режим  $R_{P-Job2}$  руху або позиціонування судна при роботі підводного корисного вантажу автономного типу – протимінного автономного ненаселеного підводного апарата), який виконує пошукову протимінну операцію та/чи операцію по нейтралізації виявленого ППНО на місці, або автономного підводного транспортувальника ППНО (далі – АНПА);

режим  $R_{P-N}$  позиціонування судна при роботі ПСА біля ППНО (його обстеження та ідентифікація, встановлення підривного заряду для нейтралізації ППНО тощо);

режим  $R_{P-A}$  руху судна у режимі запуску/пріємому авіаційного корисного вантажу (мінопошукових безекіпажних літальних апаратів, оснащених магнітометрами);

режим  $R_{P-Ret}$  руху судна у режимі підйому на борт підводного та авіаційного корисного вантажу (буксированих гідролокаторів, прив'язних буксированих, самохідних чи автономних підводних апаратів, мінопошукових безекіпажних літальних апаратів) після завершення їх роботи.

Тоді множина основних операційних режимів роботи  $R$  протимінного БНС, які вимагають синтезу окремих підсистем САК такого судна та розробки математичних моделей його функціонування, може бути представлена у наступному вигляді:

$$R = \{R_S; R_{P-Drop}; R_{P-Job1}; R_{P-Job2}; R_{P-N}; R_{P-A}; R_{P-Ret}\} \quad (2)$$

Розглянемо тепер вимоги до переліку математичних моделей динаміки протимінного БНС, які мають бути інструментом для синтезу та перевірки ефективності САК окремих складових такого судна. Очевидно, що такі моделі мають бути основою для побудови спеціалізованого моделюючого комплексу [23], за допомогою якого і будуть проводитись вказані дослідження.

У загальному випадку, виходячи з принципів системного підходу, множину  $M_{MM}$  математичних моделей для дослідження режимів (2) протимінного БНС можна представити наступною множиною:

для режиму  $R_S$  – математична модель  $M_{BHC}$  руху БНС як твердого тіла у потоці води, математична модель  $M_{33}$  зовнішніх збурень які мають силову дію на корпус БНС, математична модель  $M_{МП}$  функціонування мінопошукових пристроїв БНС, а також математичні моделі систем автоматичного керування рухом БНС  $M_{К-БНС}$  та пошуковими пристроями  $M_{К-ПП}$ ;

для режиму  $R_{P-Drop}$  – математичні моделі динаміки судна  $M_{БНС}$  та зовнішніх збурень  $M_{ЗЗ}$ , математична модель  $M_{СПП}$  функціонування суднового спуско-піднімального пристрою (СПП) та математична модель  $M_{КЛ}$  роботи кабельної лебідки (КЛ), а також математичні моделі систем автоматичного керування БНС, СПП та КЛ;

для режиму  $R_{P-Job1}$  – математичні моделі  $M_{БНС}$ ,  $M_{ЗЗ}$  та  $M_{КЛ}$ , математичні моделі  $M_{ГЗ}$  гнучкого зв'язку (кабель-буксиру ПГЛ та ПБА чи кабель-тросу ПСА) при його роботі у потоці води, математичні моделі  $M_{МБГ}$ ,  $M_{ПБА}$  та  $M_{ПСА}$  функціонування у потоці води МБГ, ПБА та ПСА як твердих тіл, що буксируються чи самостійно рухаються у потоці води, а також математичні моделі  $M_{К-БНС}$ ,  $M_{К-СПП}$ ,  $M_{К-КЛ}$ ,  $M_{К-МБГ}$ ,  $M_{К-ПБА}$  та  $M_{К-ПСА}$  систем керування, відповідно, БНС, СПП, КЛ, МБГ, ПБА і ПСА;

для режиму  $R_{P-Job2}$  – математичні моделі  $M_{БНС}$ ,  $M_{ЗЗ}$  та математична модель  $M_{АНПА}$ , а також математичні моделі  $M_{К-БНС}$  та  $M_{К-АНПА}$  функціонування САК БНС та АНПА;

для режиму  $R_{P-N}$  – математичні моделі  $M_{БНС}$ ,  $M_{ЗЗ}$ ,  $M_{КЛ}$ ,  $M_{ГЗ}$ ,  $M_{ПСА}$  та математичні моделі систем автоматичного керування  $M_{К-БНС}$ ,  $M_{К-КЛ}$ , та  $M_{К-ПСА}$ , відповідно, БНС, КЛ та ПСА;

для режиму  $RP-A$  – математичну модель  $MBНС$ , яка описує динаміку БНС, та математичну модель  $MA$  корисного вантажу (мінопошукового безпечного літального апарата) в умовах дії зовнішніх збурень (математична модель  $MЗЗ$ ), а також математичні моделі систем автоматичного керування судном і корисним вантажем  $МК-БНС$  і  $МК-A$  при його запуску на виконання місії та повернення до БНС після завершення місії;

для режиму  $R_{P-Ret}$  – математичні моделі  $M_{БНС}$ ,  $M_{ЗЗ}$ ,  $M_{КЛ}$ ,  $M_{ГЗ}$ ,  $M_{МБГ}$ ,  $M_{ПБА}$ ,  $M_{ПСА}$  та  $M_{АНПА}$ , а також математичні моделі систем автоматичного керування судном  $M_{К-БНС}$ , спуско-піднімальним пристроєм  $M_{К-СПП}$ , кабельною лебідкою  $M_{К-КЛ}$ , під-

водним та авіаційним корисним вантажем  $M_{К-МБГ}$ ,  $M_{К-ПБА}$ ,  $M_{К-ПСА}$ ,  $M_{К-АНПА}$  та  $M_{К-A}$ .

Сформуємо множину  $M_{MM}$  математичних моделей для дослідження режимів роботи (2) БНС у вигляді матриці розмірністю  $[7 \times 11]$  (рис. 1).

Отримана матриця  $M_{MM}$  утворює науково-методологічне підґрунтя організації прикладних наукових досліджень у напрямку синтезу ефективних систем автоматичного керування протимінним безпечним судном, призначеним для гуманітарного розмінування акваторій України.

Висока складність процесів синтез систем автоматичного керування протимінним БНС, яка обумовлена широким спектром мінопошукового та протимінного обладнання, робить процес розробки і випробувань таких систем тривалим у часі. Перенесення основних проектних робіт на комп'ютерні (зокрема, імерсивні) технології дасть змогу суттєво спростити дослідницьке проектування таких суден та зменшити витрати часу на роботи з перевірки працездатності систем автоматичного керування судном та його корисним вантажем. Ключовою умовою впровадження передових технологій проектування протимінних БНС є розробка їх математичних моделей. Для організації робіт по створенню таких моделей у роботі, виходячи з принципів системного підходу, сформульовано повний перелік етапів роботизованого (безлюдного) гуманітарного розмінування акваторій держави та запропоновано основні операційні режими роботи протимінного БНС.

У результаті аналізу вказаних режимів сформовано множину математичних моделей функціонування протимінного БНС та множину математичних моделей систем автоматичного керування протимінним судном та його корисним вантажем. Отримана матриця математичних моделей дає змогу формалізувати процес розробки та перевірки працездатності створюваних систем автоматичного

$R \backslash M/M_K$	$M_{БНС}/M_{К-БНС}$	$M_{ЗЗ}$	$M_{МП}/M_{К-МП}$	$M_{СПП}/M_{К-СПП}$	$M_{КЛ}/M_{К-КЛ}$	$M_{ГЗ}$	$M_{МБГ}/M_{К-МБГ}$	$M_{ПБА}/M_{К-ПБА}$	$M_{ПСА}/M_{К-ПСА}$	$M_{АНПА}/M_{К-АНПА}$	$M_A/M_{К-A}$
$R_S$	+	+	+								
$R_{P-Drop}$	+	+	+	+							
$R_{P-Job1}$	+	+			+	+	+	+	+		
$R_{P-Job2}$	+	+									
$R_{P-N}$	+	+			+	+				+	
$R_{P-A}$	+	+									+
$R_{P-Ret}$	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+

Рис. 1

керування протимінним БНС шляхом залучення імерсійних технологій проектування нової техніки.

#### Висновки.

Виходячи з принципів системного підходу сформульовано повний перелік етапів гуманітарного (безлюдного) розмінування акваторій держави на основі застосування спеціалізованого протимінного безкіпажного надводного судна, оснащеного мінопошуковим обладнанням та засобами підводної та авіаційної робототехніки. Отримані етапи дають змогу планувати задачі автоматизації робіт з гуманітарного розмінування акваторій як складові роботизованих (безлюдних) технологій очищення територіальних вод України від мінної загрози.

Запропоновано основні операційні режими роботи протимінного безкіпажного надводного судна як носія протимінного робототехнічного обладнання та які вимагають розробки окремих підсистем системи автоматичного керування таким судном.

Для кожного операційного режиму роботи протимінного безкіпажного надводного судна розроблено множину математичних моделей його функціонування в умовах дії зовнішніх збурень та множину математичних моделей функціонування його корисного вантажу, а також множину математичних моделей систем керування цими об'єктами. Це утворює науково-методологічне підґрунтя для розробки та перевірки ефективності системи автоматичного керування протимінного безкіпажного надводного судна із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій проектування нової техніки.

Подальші дослідження планується проводити у напрямку розробки математичних моделей протимінного безкіпажного надводного судна та його корисного вантажу як складових спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження систем автоматичного керування таким видом морської робототехніки.

#### Список літератури:

1. Ru-jian Yan, Shuo Pang, Han-bing Sun, Yong-jie Pang. Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 2010 – Springer. 9(4):451-457. DOI:10.1007/s11804-010-1033
2. Tian Ying. (2024). CMSI Translations #9: Mine Countermeasure Operations in a Cross-Strait Island Landing Campaign Cross-Strait Island Landing Campaign. U.S. Naval War College Digital Commons, 2024. 19 Pages. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article>
3. Inspector 125. Unmanned Surface Vehicle. <https://www.exail.com/product/inspector-125-unmanned-surface-vehicle>
4. USVs for Mine Countermeasures. <https://www.exail.com/product-range/unmanned-surface-vehicles-for-mine-countermeasures>
5. Mine Countermeasures Unmanned Surface Vehicle (MCM USV). (2019). <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2167996/mine-countermeasures-unmanned-surface-vehicle>
6. Martin Schwarz. Future Mine Countermeasures: No Easy Solutions. *Naval War College Review*, Vol. 67, No. 3 (Summer 2014), pp. 123-141 (19 pages). <https://www.jstor.org/stable/26397781?seq=1>
7. Andressen, Martin Sløveren; Mykland, Roger Brokstad. (2022). A naval design study on a small, unmanned surface vessel. 56 Pages. <https://hdl.handle.net/11250/3069267>
8. Волков О. М. (2023). Автономні надводні допоміжні судна: переваги та проблеми. *Судноводіння | Shipping & Navigation*, 2023. С. 34-42. DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.34-42
9. Textron to build mine warfare unmanned surface vessel (USV) with high-temperature superconducting magnets. <https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/55242872/high-temperature-superconducting-magnets-help-with-mine-warfare-o-unmanned>
10. John Keller. Navy MAGNUS project blends superconductor magnet and very high electrical currents for counter-mine warfare. <https://www.militaryaerospace.com/power/article/14212315/counter-mine-superconductor-magnet-electrical-currents>
11. Rui Liu, Chao Peng, Yunbo Zhang, Hannah Husarek, Qi Yu. A survey of immersive technologies and applications for industrial product development. *Computers & Graphics*. Volume 100, November 2021, Pages 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.07.023>
12. Deepti Prit Kaur, Amit Kumar, Rubina Dutta, Shivani Malhotra. The Role of Interactive and Immersive Technologies in Higher Education: A Survey. *Journal of Engineering Education Transformations*, Journal of Engineering Education Transformations, Volume 36, No. 2, October 2022, Volume 36, No. 2, October 2022. Pages 79-86. [file:///C:/Users/SLpro/Downloads/JEET2022\\_AR.pdf](file:///C:/Users/SLpro/Downloads/JEET2022_AR.pdf)
13. Закон України «Про державний кордон України». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777>
14. Закон України «Про прилеглу зону України». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2019, № 3. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2641-VIII#Text>

15. A Guide to survey and clearance of Underwater Explosive Ordnance. Geneva, April, 2016. <https://core.ac.uk/download/pdf/323031189.pdf>
16. Наказ ДСНС України N 68 від 21 січня 2020 р. «Про реалізацію основних заходів з протимінної діяльності у 2020 році та проведення спеціальних вибухових робіт». <https://dsns.gov.ua/nakazi-z-osnovnoyi-diyalnosti/103879>
17. Volodymyr S. Blintsov, Maksym H. Hrytsaienko. Special features of management of the joint projects of water zone clearing by subdivisions of the state emergency service of Ukraine and organizations developing marine robotic vehicles – «Shipbuilding and Marine Infrastructure», 2017. – № 1(7) – P. 141-151.
18. Carolay Camacho-Sanchez, Ruben Yie-Pinedo, Gina Galindo. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. Socio-Economic Planning Sciences 88 (2023). DOI: 10.1016/j.seps.2023.101611
19. Кравченко О. ДСНС отримала дрони для підводного розмінування. [https://lb.ua/society/2022/10/31/534362\\_dsns\\_otrimala\\_droni\\_pidvodnogo](https://lb.ua/society/2022/10/31/534362_dsns_otrimala_droni_pidvodnogo)
20. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H. Engineering Design: A Systematic Approach. Third Edition. Springer, 2006. <https://www.amazon.co.uk/Engineering-Design-Systematic-Approach-Pahl/dp/1846283183>
21. Блінцов В.С., Надточий А.В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення. / «Суднобудування та морська інфраструктура», 2024. Випуск № 1(18). С. 4-10. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01)
22. Секторальна робоча група «Гуманітарне розмінування». Протокол засідання 7 грудня 2023 року. <https://me.gov.ua/view/1af8ef74-3db6-45f4>
23. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Кривцун, В.О. Некрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко; за ред. С.С. Рижкова. – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 340 с.

**Kulik A.S., Nadtochy A.V., Burunina Z. Yu. PROBLEMS OF CREATING MATHEMATICAL MODELS FOR RESEARCHING AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR MINE COUNTERMEASURE UNMANNED SURFACE VESSEL**

*The main tasks that arise in the development of automatic control systems for a mine-fighting unmanned surface vessel, which is intended for humanitarian demining of the state's water areas, are considered. The need for full automation of the processes of controlling the spatial movement of the mine-fighting vessel itself and the automation of the processes of controlling its payload – mine search systems and underwater and aviation means of destroying sea mines – is shown. The role of mathematical modeling and the latest computer technologies in the development of modern automatic control systems for such objects is shown. A set of mathematical models of the main components of a mine-fighting unmanned surface vessel, its payload and automatic control systems for them have been developed. The proposed approaches are aimed at ensuring high accuracy and reliability of the functioning of mine-fighting unmanned surface vessels in difficult maritime operating conditions.*

*Purpose. Development of a set of mathematical models of the operation of a mine-countermeasures unmanned surface vessel and a set of mathematical models of the operation of its payload, as well as a set of mathematical models of control systems for these objects as a scientific and methodological basis for the development and testing of the efficiency of the automatic control system for a mine-countermeasures unmanned surface vessel.*

*Methodology. The research used the methodology of analysis of scientific and technical literature and the principle of a systems approach. The object of the research is the process of humanitarian demining of the territorial sea of Ukraine, the adjacent zone of Ukraine and the internal waters of Ukraine. The subject of the research is the process and result of the formation of a set of mathematical models of the functioning of a mine-fighting unmanned surface vessel and a set of mathematical models of the functioning of its payload.*

*Results. From the standpoint of a systems approach, a complete list of stages of robotic demining of the state's water areas has been formulated based on the use of a specialized mine-fighting unmanned surface vessel-robot, which is equipped with devices for searching, identifying and mapping sea and river mines and means of underwater and aviation robotics for their neutralization. Based on the obtained stages of work, tasks for the automation of humanitarian demining of water areas as components of robotic technologies for cleaning the territorial waters of Ukraine from the mine threat have been formed. The main operating modes of a mine-fighting unmanned surface vessel as a carrier of mine-fighting robotic equipment are described and the tasks of developing individual subsystems of the automatic control system of such a vessel are formulated. For each operating mode of a mine-fighting unmanned surface vessel, a set of mathematical models of its functioning under the influence of external disturbances and a set of mathematical models of the functioning of its payload, as well as a set of mathematical models of the control systems of these objects, have been*

*developed. This forms a scientific and methodological basis for developing and testing the effectiveness of the automatic control system of a mine-fighting unmanned surface vessel using modern computer technologies for designing new equipment.*

*Scientific novelty. The obtained set of stages of robotic humanitarian demining of water areas and the operating modes of a mine-fighting unmanned surface vessel together with the developed set of mathematical models of the functioning of these objects and their automatic control systems make it possible to involve high-performance computer technologies for the synthesis of automatic control systems for mine-fighting marine robotics.*

*Practical significance. The obtained set of mathematical models of the functioning of a mine-fighting unmanned surface boat and its onboard mine detection and neutralization equipment will make it possible to increase the productivity and quality of design work on the creation of automatic control systems for newly created marine robotics equipment at the stage of their research design.*

**Key words:** *mine-fighting unmanned surface vessel, automatic control system, mathematical model.*