

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Львівська політехніка»

АЛОБА ЛЕО ТОСІН

УДК 629.58 : 681.51

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ
АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ
АПАРАТАМИ ПОШУКОВОГО ТИПУ**

05.13.03 – системи та процеси керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: - доктор технічних наук, професор
Блінцов Володимир Степанович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Паранчук Ярослав Степанович,
Національний університет
"Львівська політехніка",
професор кафедри електромехатроніки та
комп'ютеризованих електромеханічних систем;

- кандидат технічних наук,
Бурнашев Віталій Віталійович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського",
доцент кафедри систем керування
літальними апаратами.

Захист відбудеться "14" травня 2021р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.18 Національного університету "Львівська політехніка" (79005, м. Львів, вул. Князя Романа, 1, к. 202).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий "13" квітня 2021р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.18,
доктор технічних наук, професор

В.В.Хома

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) є важливим інструментом для морських операцій з пошуку підводних об'єктів, розвідки корисних копалин, природоохоронних досліджень. Практика виконання більшості таких операцій вимагає високої продуктивності підводних робіт. Магістральним напрямком підвищення продуктивності АНПА є їх групове застосування, коли декілька АНПА одночасно виконують спільну підводну місію. Особливо ефективним таке застосування є для пошукових підводних робіт, до яких висуваються жорсткі обмеження у часі виконання місії.

Одним з ключових наукових завдань організації групового застосування АНПА є забезпечення їх безаварійного руху в режимах групового переходу та групового виконання підводної місії. Це вимагає синтезу відповідної системи автоматичного керування (САК) окремим АНПА як «агентом» групи, що функціонує автономно, виконуючи спільну підводну місію у складі групи, та рухається без зіткнень з іншими АНПА групи і одночасно контролює максимально припустиме віддалення до сусідніх АНПА для збереження групи.

Вказана постановка завдання є обов'язковою складовою автоматичного керування групами літаючих та колісних роботів. Суттєві результати для вказаних типів робіт отримано вітчизняними науковцями професорами О.Ю. Бочкарьовим, В.А. Голембо, О.В. Збруцьким, А.С. Куліком, В.П. Харченком. Щодо засобів підводної робототехніки, то автоматизації їх групового руху присвячено роботи зарубіжних науковців Кисельова Л.В., Інзарцева А.В. та Пшихопова В.Х. (Росія), А. Р. Aguiar, J.Almeida (Італія), Fossen Т. (Норвегія), Madhevan Balasundaram (Індія), Zhongkui Li та Xin Li (Китай). Роботи названих та інших дослідників присвячені, в основному, завданням глобальної навігації групи роботів і досліджують особливості керування групою поведінкою автономних роботів. Питання локальної навігації окремого АНПА як «агента» групи на цей час у повному обсязі в науковій літературі не висвітлені, що і обумовлює актуальність дисертаційного дослідження.

Об'єктом дослідження є керований автоматичний рух групи АНПА в режимах групового переходу та групового виконання спільної підводної пошукової місії.

Предметом дослідження є автоматичне керування безаварійним рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є вдосконалення системи автоматичного керування безаварійним рухом одиночного автономного ненаселеного підводного апарата як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів при виконанні ними спільної підводної пошукової місії.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовані та розв'язані наступні задачі:

- визначено характеристики сучасних АНПА як об'єктів керування, призначених для виконання пошукових місій у режимі групового застосування, встановлено особливості сучасних методів групового застосування АНПА та організації керування групою пошукових АНПА;

- виконано аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА та

сформульовано актуальні задачі автоматизації підводних пошукових операцій;

- виконано аналіз сучасних методів комп’ютерного та експериментального дослідження керованого руху одиночного АНПА як «агента» групи АНПА, що виконують спільну підводну пошукову місію;

- синтезовано систему автоматичного керування морським безекіпажним комплексом із групою пошукових АНПА та систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи;

- виконано експериментальне дослідження синтезованої системи автоматичного керування одиночним АНПА як «агентом» групи.

Методи дослідження. Для розв’язку поставлених у дисертаційній роботі завдань використано наступні методи дослідження: методи класичної теорії автоматичного керування (для синтезу системи автоматичного керування); методи нечіткої логіки (для синтезу законів керування рухом АНПА як «агента» групи); методи системного аналізу та наукової класифікації (для класифікації методів групового застосування АНПА при виконанні ними спільної підводної пошукової місії); математичний апарат теорії матриць (для математичного моделювання процесів функціонування окремих блоків синтезованої системи керування веденим АНПА); методи комп’ютерного дослідження та натурального експерименту (для перевірки працездатності створеної системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи).

Наукова новизна отриманих результатів:

- *вперше* на основі реалізації принципів адгезії, когезії та вирівнювання розроблено систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи шляхом уведення блоків «Модель навігаційної обстановки», «Ідентифікатор навігаційних загроз», «Бортовий керуючий контролер» та розроблено їх базове математичне забезпечення, що виключає аварійне зіткнення з сусідніми АНПА групи та розпад групи через втрату сенсорного контакту між ними;

- **удосконалено** систему автоматичного керування рухом одиночного АНПА, що працює у складі групи підводних апаратів, шляхом включення до її складу двох нечітких регуляторів, а саме регулятора дистанції до навігаційно небезпечного сусіднього АНПА групи та регулятора курсу власного АНПА, що забезпечує безаварійний рух одиночного АНПА у складі групи;

- **удосконалено** алгоритм керування безекіпажним морським комплексом у складі безекіпажного надводного судна та групи автономних ненаселених підводних апаратів на борту на всіх основних етапах підводної пошукової місії, що складає теоретичну основу синтезу ефективних систем автоматичного керування підводними місіями на віддалених акваторіях та підвищує продуктивність підводних пошукових операцій на таких акваторіях.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 17 працях, у тому числі 6 статтях у фахових наукових виданнях України (2 одноосібно), з них 1 стаття у виданні, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Апробацію дисертаційної роботи підтверджує 8 публікацій (5 одноосібно) в матеріалах: міжнародних науково-технічних конференцій (4 публікації), всеукраїнських науково-технічних конференцій (3 публікації) та відомчих науково-технічних конференцій (1 публікація).

Додатково відображають наукові результати дисертації з статті у збірниках наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації, що визначають її зміст і висновки, одержані та сформульовані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

– у статті [1] – розробка математичної моделі САК АНПА, що працює як «агент» у сукупності інших об'єктів;

– у статті [2] – структурна схема САК рухом АНПА як «агента» групи, яка забезпечує стабілізацію швидкості прямолінійного руху, курсу і глибини занурення апарата, а також реалізує алгоритми адгезії і когезії для забезпечення погодженого руху двох підводних апаратів;

– у статті [3] – базова технологія виконання морської підводної пошукової місії за допомогою безекіпажного морського комплексу як носія групи АНПА, яка включає десять етапів, та САК просторовим рухом окремого АНПА групи, яка містить блоки «Модель навігаційної обстановки» і «Ідентифікатор навігаційних загроз»;

– у статті [6] – процес та алгоритм функціонування САК веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів, який реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на 5 науково-технічних, та 3 міжнародних конференціях: 16 науково-технічна конференція (м. Чернігів, 2016); XXIII міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика – 2016» (м. Суми, 2016); «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2018, 2019); Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (м. Херсон, 2019); Інновації в суднобудування та океанотехніці (м. Миколаїв, 2019, 2020).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 203 сторінки, у тому числі 137 сторінок основного тексту, 4 таблиці, 45 рисунків, 135 найменування використаних джерел.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка теоретичних основ створення «інтелектуальних» підводних апаратів-роботів», № державної реєстрації 0111U002314, «Розробка теоретичних основ групового керування автономними підводними апаратами», № державної реєстрації 0113U000243, «Розробка теоретичних основ та програмно-технічних засобів керування багатопільовим морським безекіпажним комплексом», № державної реєстрації 0115U000307

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичні результати дисертаційних досліджень передані для використання до Державного підприємства «Дослідно-проектний центр кораблебудування» (м. Миколаїв) та впроваджені у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України при підготовці магістрів за освітньо-

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі наведені загальна характеристика сучасних малогабаритних АНПА, призначених для виконання підводних пошукових місій (ППМ) в режимі групового застосування (ГЗ) і розглянуті коротко особливості побудови типового АНПА, що відображає специфіку ППМ. На основі аналізу сучасного стану в галузі підводної робототехніки показано, що одним з активно розроблюваних її напрямків є ГЗ АНПА. У світовій практиці цей прикладний напрямок робототехніки має назву «Collective Cognitive Robots» (CoCoRo, колективні когнітивні апарати-роботи) і сьогодні перебуває на початковій стадії розробки.

Виконано аналіз сучасних технологій ГЗ АНПА для проведення підводних пошукових місій (ППМ), наукових і природоохоронних досліджень, дослідницьких та інспекційних підводних робіт.

Показано, що концептуально в розвитку технологій ГЗ спостерігається два напрямки автоматизації – автоматизація АНПА як «агента» групи C_{Ag} та автоматизація технологій керування ГЗ АНПА C_{Gr} . Для кожного з напрямків автоматизації характерна наявність трьох основних рівнів – базового рівня B автоматизації окремого АНПА, локального рівня L ГК АНПА і глобального рівня G автоматизації підводних пошукових технологій:

$$C_{Ag} = \{B_{Ag}; L_{Ag}; G_{Ag}\}; \quad C_{Gr} = \{B_{Gr}; L_{Gr}; G_{Gr}\}. \quad (1)$$

Проведено аналіз способів організації керування групою пошукових АНПА та виділено два основні – централізоване і децентралізоване керування групою АНПА, а також додатковий – напівдецентралізоване керування, що поєднує в собі деякі властивості двох попередніх основних способів керування групою.

Сформульовано перелік типових задач керування АНПА в режимах одиночного і ГЗ при навігації в складних навігаційних умовах, завдань навігаційного забезпечення одиночного АНПА і завдання ГЗ АНПА.

Сформульовано головні задачі дисертаційного дослідження:

- для першого напрямку C_{Ag} автоматизації Co-Co-Ro-технологій – задачі автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА;

- для другого напрямку C_{Gr} автоматизації Co-Co-Ro-технологій – задачі автоматизації планування та виконання групового пошуку як одного з базових алгоритмів керування групою АНПА та задачі автоматизації керування окремими видами підводних пошукових операцій.

У другому розділі синтезовано САК рухом одиночного АНПА, як «агента» групи на базі нечітких регуляторів (рис. 1). Дана система складається з двох ПД-регуляторів: регулятора, що забезпечує дотримання заданої дистанції d_s до АНПА-сусіда, та регулятора курсу ψ . Об'єктом керування є АНПА, математична модель якого містить модель зовнішнього корпусу (ЗК) і рушійно-стернового комплексу у складі гребного гвинта контрротаторного обертання з гребним електроприводом та вертикального і горизонтального стерен з електроприводами їх повороту.

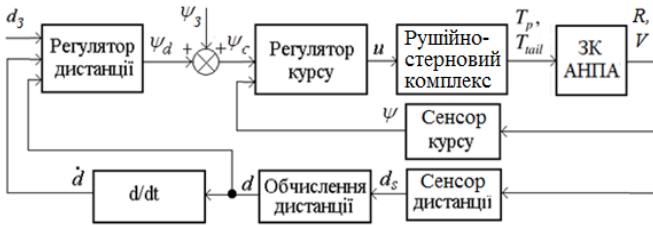


Рисунок 1 – Структурна схема САК рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА

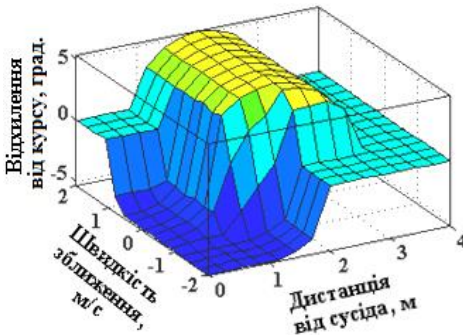
Основний закон динаміки ЗК АНПА у матричній формі має наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_A V}{dt} &= I^{-1}(T - KIV); \\ \frac{d_B R}{dt} &= K_V(V + V_s), \end{aligned} \right\} (2)$$

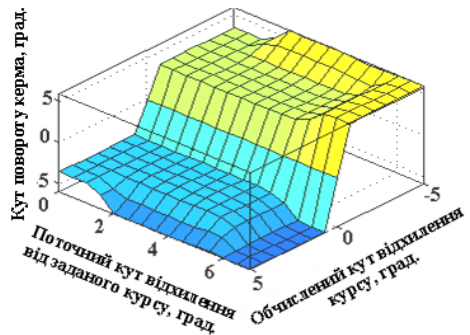
де: V – матриця швидкісних кінематичних параметрів

АНПА; R – матриця позиційних кінематичних параметрів АНПА; I – матриця власних та приєднаних мас АНПА; T – матриця рівнодіючих сил та моментів, які діють на АНПА; K – матриця, яка враховує переносну швидкість при взятті похідної по відношенню до ЗСК; K_V – матриця зв'язку поступального та обертового рухів АНПА; V_s – матриця поправки на швидкість течії.

Індекс A знаку диференціала означає, що похідна розраховується відносно базису A , тобто базису ЗСК. Індекс B знаку диференціала означає, що похідна розраховується відносно базису B , тобто базису БСК. В усталеному режимі одиночний АНПА рухається заданими для групи курсом ψ_s та швидкістю v_x . Вказані регулятори є нечіткими ПД-регуляторами типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги (рис. 2). Отримана САК забезпечує безаварійний рух одиночного АНПА у складі групи.



а – регулятор дистанції



б – регулятор курсу

Рисунок 2 – Поверхні виходів нечітких регуляторів

Розроблено узагальнену структуру моделюючого комплексу для дослідження ефективності САК групою АНПА, яка виконує ППМ (рис. 3). Математична модель ММ-1 відображає процеси за участю людей-операторів з генерування множини M_{UM} ППМ $M_{UMi} \subset M_{UM}$ для конкретної групи ведених АНПА, які вони повинні виконувати під управлінням ведучого АНПА-1:

$$M_{UMi} = \{A_{Hi}; A_{Wi}; Z_{Wij}; R_{Wij}\}. \quad (3)$$

де A_{Hi} – гідрологія i -ї робочої акваторії, A_{Wi} – гідрологія акваторії переходу до неї від

місця випуску групи АНПА, Z_{wij} – характеристики об'єктів пошуку розташованих на цих акваторія і R_{wij} – вимоги по обстеженню і документуванню.

На модель ММ-1 від ММ-2 і ММ-3 надходить інформація про фактичне планування \tilde{M}_{UMp} і виконання \tilde{M}_{UMr} завдань G і L ієрархічних рівнів групою АНПА.

Знак « \sim » означає, що вказані завдання надійшли з деякими обмеженнями, обумовленими роботою каналу радіогідроакустичного буя (РГАБ) ведучого АНПА.

Моделі ММ-4-1 і ММ-4-2 враховують можливе корегування ППМ (знак « \approx » та індекс « v ») при моделюванні роботи групи АНПА в умовах стислої навігації.

Моделі ММ-4-3 і ММ-4-4 дають змогу досліджувати вплив навігаційних S_N і пошукових S_S сенсорів на ефективність роботи САК АНПА-1.

Модель ММ-4 містить моделі наступних чотирьох рівнів керування:

- модель ММ-4-5 стратегічного організатора групи, де виконується планування та контроль виконання ППМ в умовах змінного середовища G_{Gr} ;

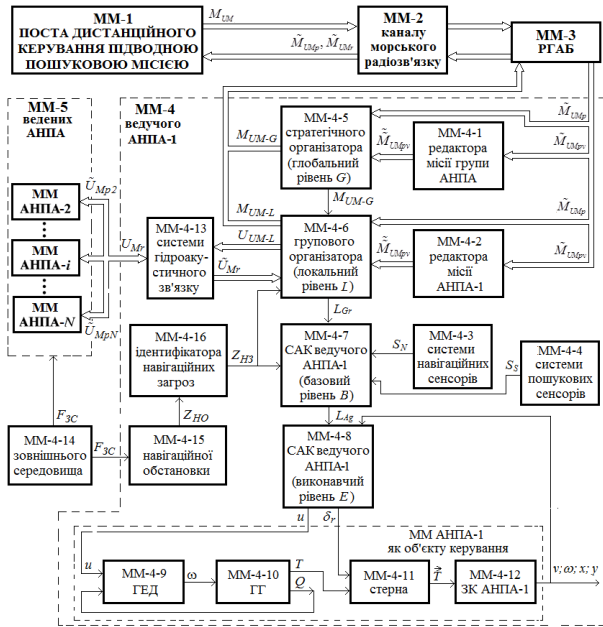


Рисунок 3 – Узагальнена структура моделюючого комплексу для дослідження ефективності САК групою АНПА, яка виконує спільну ППМ

вихідними сигналами ММ-4-8 є сигнал керування u напругою електричного двигуна як привода гребного гвинта АНПА-1 і кут δ_r перекладки стерна рушійно-стернового комплексу АНПА-1 (в дисертації розглядається плоский рух для всіх АНПА групи);

- моделі ММ-4-9...ММ-4-12 описують динаміку АНПА як твердого тіла у воді.

Модель ММ-4-13 описує функціонування системи гідроакустичної зв'язу (СГАЗ) між ведучим АНПА-1 і веденими АНПА групи. Результатом роботи моделі є: потоки сигналів керування U_{UM-L} від ММ-4-6, які після проходження через ММ-4-

- модель ММ-4-6, де моделюється узгоджена робота групи АНПА при виконанні i -ї підводної місії; на цьому рівні розв'язуються задачі L_{Gr} (керування окремим видом ППМ) та B_{Gr} (керування груповим пошуком підводного об'єкта);

- модель ММ-4-7 САК ведучого АНПА-1 групи, який працює в умовах близькості інших ведених ним АНПА; тут розв'язується задача L_{Ag} забезпечення навігаційної безпеки просторового руху АНПА у складі групи;

- модель ММ-4-8, де моделюється керований рух АНПА-1 як одиночного підводного апарата, який повинен підтримувати задані курс і швидкість руху;

13 приймають значення $\tilde{U}_{Mp2...N}$ і мають забезпечити виконання місії веденими АНПА, а також потоки сигналів U_{Mr} від моделей ведених АНПА (ММ-5), які після проходження через ММ-4-13 приймають значення \tilde{U}_{Mr} і несуть інформацію про фактичне виконання місії групою ведених АНПА.

Модель ММ-4-14 містить моделі сенсорів зовнішніх сил (СЗС) гідродинамічної природи $F_{ЗС}$, які діють на зовнішні корпуси АНПА-1 і АНПА-2 ... N (вплив течії, зміна гідрофізичних параметрів води і т.п.). До складу моделюючого комплексу введена математична модель ММ-4-15, яка надає інформацію $Z_{НО}$ про дистанції до сусідніх АНПА групи і про інші загрози безпечному руху цього підводного апарата, а також модель ММ-4-16, яка генерує інформацію $Z_{НЗ}$ про ступінь навігаційних загроз безпечному руху АНПА-1.

В третьому розділі запропоновано класифікацію ППМ та розглянуто основні її види для централізованого керування (рух фронтом, уступом, клином, радіальний рух, рух по колу та по концентричних колах, рух по спіралі Архімеда; просторовий рух) і децентралізованого керування (ройовий, зграйний та колективний рух). Отримано аналітичні залежності для автоматичного планування ППМ з урахування обмежень на кількість АНПА у групі та на час виконання ППМ, що утворює аналітичну основу для синтезу САК ведучого АНПА-1 при реалізації задачі керування B_{Gr} .

З метою підвищення продуктивності ППМ на віддалених морських акваторіях запропоновано використовувати безекіпажний морський комплекс (БМК) у складі безекіпажного надводного судна (БНС) з групою АНПА на борту.

Автоматичне керування БМК (завдання L_{Gr}) пропонується виконувати у складі десяти етапів (рис. 4), які охоплюють: 1) автоматичний перехід БНС в задану акваторію SC_{MUC1} ; 2) обчислення необхідної кількості АНПА в групі N для виконання ППМ, автоматичний випуск групи АНПА з борта БНС в море в заданій точці морської акваторії RS_{AUV} та, одночасно, позиціонування БНС у точці випуску P_{USV} ; 3) автоматичне формування випущених АНПА в групу для колективного переходу в робочу зону F_{MAS1} ; 4) автоматичний груповий перехід випущених АНПА в робочу зону заданої акваторії T_{MAS1} ; 5) автоматичне заняття кожним АНПА групи початкової позиції S для узгодженого просторового руху по заданій траєкторії пошуку S_{MAS} ; 6) автоматичне виконання групою ППМ J_{MAS} ; 7) автоматичний збір АНПА в групу для повернення до БНС F_{MAS2} ; 8) автоматичний груповий перехід АНПА до БНС T_{MAS2} ; 9) автоматичне повернення групи АНПА на борт БНС CS_{AUV} ; 10) автоматичний перехід БМК в порт базування SC_{MUC2} :

$$A_{MUC} = \{SC_{MUC1}; RS_{AUV}; F_{MAS1}; T_{MAS1}; S_{MAS}; J_{MAS}; F_{MAS2}; T_{MAS2}; CS_{AUV}; SC_{MUC2}\}. \quad (4)$$

В рамках удосконалення керування роботою БМК синтезовано САК веденого АНПА та удосконалено САК одиночного АНПА групи (етапи 4 і 8 безаварійного переходу групи АНПА), використано отримані у роботі аналітичні залежності для оцінки необхідної кількості N апаратів у групі та часу виконання ППМ (етап 2).

Нетривіальним завданням керування роботою БМК є необхідність організації руху випущених АНПА за спеціальними траєкторіями очікування (етап 3), що має забезпечити утримання перших випущених АНПА у складі групи у процесі випуску наступної партії підводних апаратів.

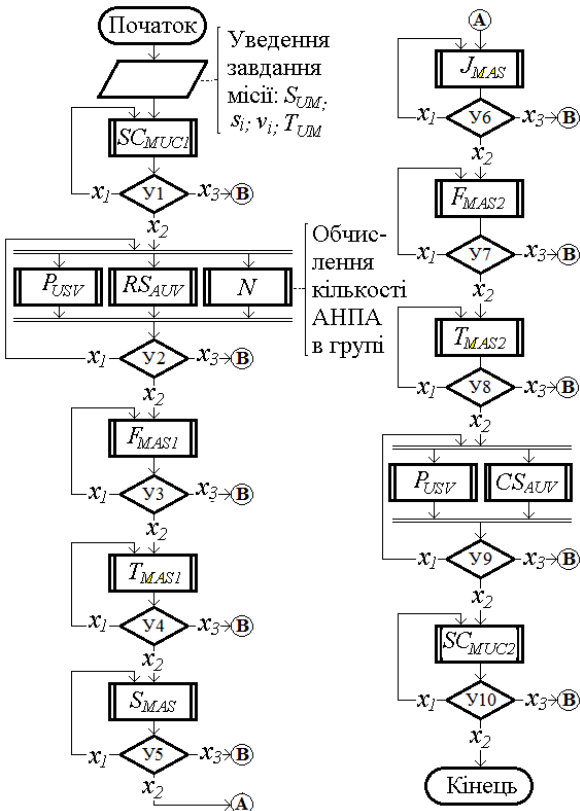


Рисунок 4 – Алгоритм керування МБК з групою пошукових АНПА

Зазначимо, що задача забезпечення безаварійного руху АНПА заданим курсом φ_{MAS1} із заданими швидкістю v_{MAS1} та глибиною h_{MAS} є типовою задачею групового руху будь-якого i -го веденого АНПА. Алгоритм функціонування САК i -м веденим АНПА в режимі групового переходу наведено на рис. 5, де:

Б1 – опитування ведучого АНПА-1 відносно поточного етапу ППМ; тут також вводяться завдання на ГП;

Б2 – умовний перехід X_1 , який містить підготовчі операції САК веденим АНПА як «агентом» групи;

Б3 – завантаження до пам'яті бортового керуючого контролера (БКК) веденого АНПА програми виконання поточної пошукової місії J_{MAS} ;

Б4 – виконання етапу F_{MAS1} самоорганізації випущених АНПА;

Б5 – ініціалізація виконання поточного етапу пошукової місії J_{MAS} ;

Б6 – опитування сенсорів навігаційної системи (СНС) i -го веденого АНПА, які дають інформацію I_{CHC1} про фактичні значення його лінійної v_i та кутової ω_i швидкостей АНПА, курсу φ_3 та глибина занурення h_i .

При формуванні плоскої конфігурації групи АНПА такої траєкторію слід будувати у формі спіралі Архімеда, що розходить, з кроком спіралі $a \leq r_c$, де r_c – радіус дії системи підводного зв'язку АНПА. Тоді при застосуванні виконавчого механізму конвеєрного типу суднова САК, яка керує випуском АНПА, має виконувати їх випуск з інтервалом часу $\Delta t = s_{AUV}/v_{AUV}$, де $d < s_{AUV} < r_c$ – відрізок спіральної траєкторії випущеного АНПА, d – мінімальна безпечно припустима дистанція між сусідніми АНПА; v_{AUV} – лінійна швидкість руху випущеного АНПА на траєкторії очікування.

Отриманий алгоритм може слугувати основою синтезу структури САК МБК, що виконує ППМ на віддалених морських акваторіях.

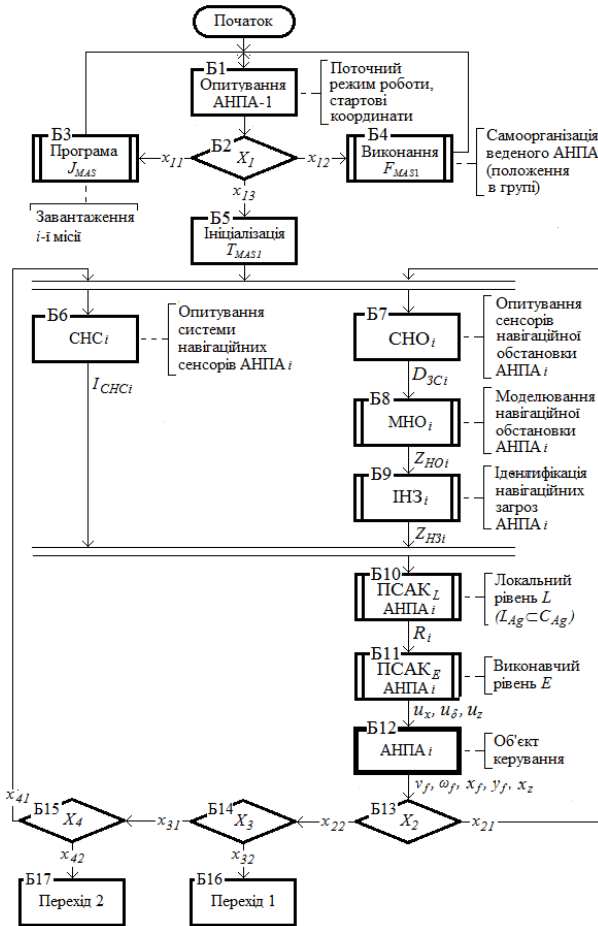


Рисунок 5 – Алгоритм роботи САК

i-м веденим АНПА в режимі групового переходу

Б7 – опитування сенсорів навігаційної обстановки (СНО) навколо *i*-го веденого АНПА; тут отримується інформація D_{3C} про АНПА-сусідів по групі, які рухаються паралельними курсами і можуть створювати навігаційні перешкоди руху для *i*-го веденого АНПА;

Б8 – аналіз та моделювання навігаційної обстановки (МНО) навколо *i*-го веденого АНПА; тут на основі інформації від Б7 виділяються дистанції та пеленги (курсові кути) до найбільш небезпечних (найближчих) АНПА-сусідів, які створюють навігаційні загрози для *i*-го АНПА;

Б9 – аналіз та ідентифікація навігаційних загроз (ІНЗ) для *i*-го веденого АНПА; тут визначаються статичні й динамічні характеристики руху АНПА-сусідів, на основі чого кількісно оцінюються можливі ризики зіткнень або втрати зв'язку з ними в результаті неприпустимого збільшення дистанції, а також формуються рекомендації щодо нейтралізації кожної виявленої загрози шляхом маневрування АНПА;

Б10 – забезпечення локального рівня *L* автоматичного керування рухом *i*-го веденого АНПА в умовах навігаційних загроз двох типів – навігаційної близькості сусідніх підводних апаратів групи та можливої втрати гідроакустичного зв'язку з сусідніми АНПА з-за неприпустимо великої дистанції до них;

Б11 – реалізація виконавчого рівня *E* керування рухом *i*-го веденого АНПА шляхом підтримання заданих значень курсу і швидкості лінійного руху (підсистема ПСАК_E);

Б12 – об'єкт керування (*i*-й ведений АНПА), основними виходами якого є фактичні значення лінійної v_f і кутової ω_f швидкостей АНПА та поточні координати його плоского руху (x_f, y_f);

Б13 – умовний перехід X_2 , який контролює продовження (умова x_{21}) чи завершення (умова x_{22}) завершення маневру безпечного розходження;

Б14 – умовний перехід X_3 , який контролює завершення етапу T_{MAS1} групового переходу за ознакою розрахункової тривалості місії і забезпечує продовження етапу (умова x_{31}) або перехід до блоку Б16 (умова x_{32}) для виконання наступного етапу;

Б15 – умовний перехід X_4 , який контролює показники енергетичного забезпечення етапів F_{MAS1} та T_{MAS1} (умови x_{41} та x_{42}); у разі зниження енергетичних показників джерела енергії i -го веденого АНПА (умова x_{42}) виконується перехід до блоку Б17 (умова x_{42}) для дострокового завершення місії цим підводним апаратом.

Запропонований алгоритм функціонування САК i -м веденим АНПА в режимі групового переходу відтворює основні завдання для системи автоматичного керування групою АНПА і, таким чином, утворює методологічну основу для розробки окремих найбільш складних складових такої САК.

Теоретичною основою автоматизації групового руху є поняття вирівнювання A_{GU} , адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} . Поняття вирівнювання передбачає утримання стабільними трьох параметрів автоматичного руху групи АНПА:

$$A_{GU} = \{\varphi_{MAS}; v_{MAS}; h_{MAS}\}. \quad (5)$$

Поняття адгезії передбачає завдання кожному АНПА як агенту групи рухатись з урахуванням A_{GU} та одночасним контролем мінімально можливої дистанції між окремим агентом та його сусідами, безпечної з позицій зіткнення:

$$A_{GA} = \{x_i \geq x_{min}\}_{i=1...W} \quad (6)$$

де x_i – дистанція від i -го веденого АНПА до сусіднього АНПА за курсовим кутом KK_i ; x_{min} – мінімально можлива безпечна дистанція до сусіднього АНПА; W – кількість напрямків (курскових кутів), контрольованих відповідними навігаційними далекомірами i -го веденого АНПА.

Поняття когезії передбачає завдання кожному агенту групи рухатись з урахуванням A_{GU} та одночасним контролем максимально можливої дистанції між i -м веденим АНПА та його сусідами, безпечної з позицій втрати сенсорного контакту (наприклад, гідроакустичного зв'язку) і, як наслідок, втрати групи АНПА у результаті її «розпорошення»:

$$A_{GC} = \{x_i \leq x_{max}\}_{i=1...S} \quad (7)$$

де x_{max} – максимально припустима дистанція між i -м веденим АНПА та сусіднім АНПА, при якій зберігається надійний сенсорний контакт між ними.

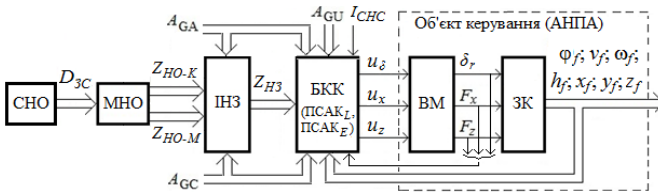


Рисунок 6 – Структура САК одиночним АНПА як агентом групи

Структура запропонованої САК одиночним АНПА як агентом групи наведено на рис. 6. Блок «Сенсори навігаційної обстановки» (СНО) i -го веденого АНПА містить набір з W сенсорів контролюю-

ваних напрямків для вимірювання дистанцій до цілей, які виявляються в секторах їх вимірювань. На виході СНО формуються множини сигналів про дистанції до сусідніх АНПА $D_{3C} = \{D_{3Ci}; \dots D_{3Cw}; \dots D_{3CW}\}$ та пеленги A_{3C} чи курсові кути KK_{3C} на них. Кожний елемент множини сигналів D_{3Cw} може містити декілька дистанцій d_{wi} , якщо у секторі вимірювань w -го сенсора знаходиться декілька АНПА-сусідів.

Курсові кути KK_w (пеленги α_w) на такі АНПА будуть однаковими і визначаються розташуванням відповідного сенсора на корпусі АНПА у зв'язаній системі координат (ЗСК). Тоді множину D_{3C} можна представити однойменною матрицею D_{3Ci} дистанцій від i -го веденого АНПА до сусідніх АНПА, яка має розмір $[W \times N]$, де W – кількість сенсорів (контрольованих напрямків) навігаційної обстановки i -го веденого АНПА; N – кількість АНПА в групі:

Блок «Модель навігаційної обстановки» (МНО) на основі сигналів D_{3Ci} формує поточну статичну та динамічну характеристики цілей (АНПА-сусідів) навколо свого АНПА, визначає K найближчих АНПА-сусідів, які утворюють найбільшу загрозу зіткнення для нього та визначає M найвіддаленіших від нього АНПА-сусідів, що утворюють загрозу неприпустимо великої відстані від нього і втрати гідроакустичного зв'язку (відповідно, вихідні змінні Z_{HO-Ki} і Z_{HO-Mi}).

У блоці МНО виконуються наступні операції: 1) визначаються мінімальні D_{HO-Ki} та максимальні D_{HO-Mi} дистанції до виявлених АНПА-сусідів та визначаються пеленги на них (A_{HO-Ki} , A_{HO-Mi}) та/чи курсові кути (KK_{HO-Mi} , KK_{HO-Ki}); 2) за допомогою обчислювача похідних визначаються динамічні характеристики руху виявлених АНПА-сусідів по груповому руху – лінійні швидкості руху V_{HO-Ki} , з якими вони змінюють дистанцію до i -го веденого АНПА, та курсові кути KK_{HO-Mi} . У результаті формується дві множини параметрів, які характеризують навігаційну обстановку навколо i -го веденого АНПА:

$$\begin{aligned} Z_{HO-Ki} &= \{D_{HO-Ki}; A_{HO-Ki}; KK_{HO-Ki}; V_{HO-Ki}\}, \\ Z_{HO-Mi} &= \{D_{HO-Mi}; A_{HO-Mi}; KK_{HO-Mi}; V_{HO-Mi}\}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $K \leq W$ і $K \leq N$.

Для зручності подальшого використання при синтезі САК i -м веденим АНПА отримані множини параметрів представлено двома парами матриць розміром $[W \times K]$ та $[W \times M]$, у яких статичні і динамічні характеристики АНПА-сусідів зв'язані з сенсорами контрольованих напрямків блоку СНО (зазвичай, курсовими кутами, а саме: двома матрицями дистанцій до найближчих АНПА-сусідів D_{HO-Ki} і швидкостей їх зближення чи віддалення V_{HO-Ki} , та двома матрицями дистанцій до найвіддаленіших АНПА-сусідів D_{HO-Mi} та швидкостей зміни дистанцій до них V_{HO-Mi}).

Блок «Ідентифікатор навігаційних загроз» (ІНЗ) оцінює ступінь загрози зіткнення з АНПА-сусідами та/чи загрозу втрати гідроакустичного контакту з ними у випадку плоского горизонтального руху з урахуванням динаміки руху групи з $k \in K$ виявленими найближчими АНПА-сусідами та з $m \in M$ виявленими найвіддаленішими АНПА-сусідами за $w \in W$ контрольованими напрямками.

Вхідними даними для роботи блоку ІНЗ є матриці D_{HO-Ki} та V_{HO-Ki} , які містять інформацію про дистанції до K та M навігаційно небезпечних сусідніх АНПА та про швидкості їх зміни за W напрямками. Вихідними даними блоку ІНЗ є матриці D_{H3-Ki} , D_{H3-Mi} , V_{H3-Ki} , V_{H3-Mi} , які характеризують мінімальні і максимальні дистанції до АНПА-сусідів та швидкості їх зміни у часі. Крім того, вихідними даними блоку ІНЗ

є множина P_{H3i} рекомендацій щодо нейтралізації кожної окремої (одиначно діючої) w -ї виявленої загрози, елементи якої отримуються із застосуванням теорії нечіткої логіки.

Блок «Бортовий керуючий контролер» (БКК) розв'язує три основні задачі:

- формування керуючого рішення R_i для реального маневрування i -го веденого АНПА з метою уникнення зустрічі з одиночною R_1 чи груповою R_w загрозою та, одночасно, з метою зберегти себе у складі групи, не втративши зв'язок з найближчим АНПА-сусідом (локальний рівень L керування, підсистема ПСАК $_L$);

- формування керуючих впливів на виконавчі механізми (ВМ) i -го веденого АНПА з метою реалізації його безпечного руху у складі групи АНПА з дотриманням вимог режимів адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$);

- формування керуючих впливів на ВМ i -го веденого АНПА з метою реалізації режиму A_{GU} вирівнювання i -го веденого АНПА, тобто утримання заданих йому параметрів руху як «агенту» групи АНПА (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$).

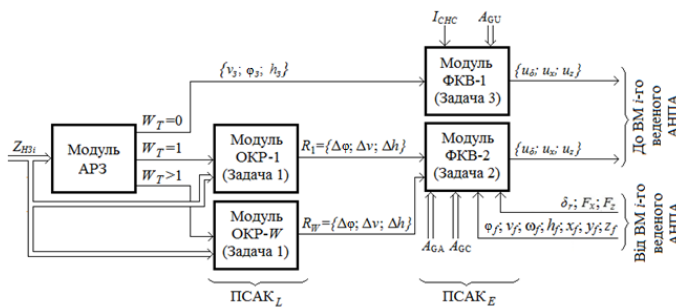


Рисунок 7 – Структура блоку БКК

Структура блоку БКК наведена на рис. 7. Модуль «Аналіз рівня загроз» (АРЗ) визначає кількість контрольованих напрямків, за якими одночасно існують навігаційні загрози для i -го веденого АНПА від найближчих АНПА-сусідів. Тут на

основі аналізу матриці навігаційних загроз $D_{H3-K1i} \subset Z_{H3i}$ шляхом сортування обчислюється кількість її ненульових елементів $W_T \leq W$ за виразом:

$$W_T = \begin{cases} 0, & \text{якщо } D_{H3-K1i} = 0 \text{ (нульова матриця } D_{H3-K1i}); \\ 1, & \text{якщо виявлено одиночну загрозу;} \\ > 1, & \text{якщо виявлено більше однієї загрози.} \end{cases} \quad (9)$$

Якщо $W_T=0$, це означає, що навігаційних загроз i -го веденого АНПА не виявлено і його САК виконує вирівнювання A_{GU} , тобто у модулі «Формування керуючих впливів-1» (ФКВ-1) формує керуючі впливи $\{u_{xi}; u_{xi}; u_{xi}\}$ для ВМ АНПА на утримання стабільними трьох заданих параметрів автоматичного групового руху.

Якщо $W_T=1$, це означає, що виявлено одну-єдину навігаційну загрозу, а її нейтралізацію слід виконувати, скориставшись рекомендаціями матриці P_{H3i} розміром $[W \times 3]$, елементи $p_{H3wi} = \{\Delta\phi_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ якої містять рекомендовані керуючі реакції i -го веденого АНПА на кожну w -ту виявлену загрозу. Для цього до структури БКК введено модуль «Обчислення керуючих рішень» (ОКР-1), де з використанням матриці рекомендацій P_{H3i} визначається керуюче рішення $R_i = \{\Delta\theta;$

$\Delta u_i; \Delta h_i$ для конкретної навігаційної ситуації з одним АНПА-сусідом. Керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ для ВМ обчислюються у модулі «Формування керуючих впливів-2» (ФКВ-2), з дотриманням вимог режимів адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} .

При $W_T > 1$ керуюче рішення R_i шукається для кожної комбінації загроз окремо. Для цього до складу блоку БКК уведено модуль «Обчислення керуючих рішень» (ОКР- W), зміст якого визначається значенням W i -го веденого АНПА. Керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ для ВМ цього АНПА також обчислюються у модулі ФКВ-2.

В четвертому розділі представлені результати проведення морського натурального експерименту з перевірки працездатності САК АНПА. У якості макета АНПА-1 було використано телекерований ненаселений самохідний підводний апарат (ТНПА), а в якості АНПА-сусіда – радіокерований катер (РКК). На рис. 8 у якості прикладу наведено перехідні процеси при реалізації режиму адгезії.

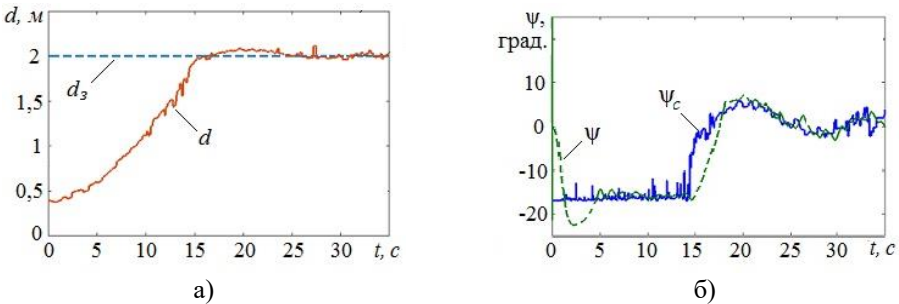


Рисунок 8 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії:
а) дистанція між ТНПА і РКК; б) відхилення ТНПА від курсу

В експерименті ТНПА був виведений на відстань 0,4 м від РКК. При заданій дистанції між апаратами $d_3=2$ м перехідний процес віддалення ТНПА від РКК на цю дистанцію мав аперіодичний характер з перерегулюванням 6,7% (d – первинний сигнал СНО). Тривалість перехідного процесу склала не більше 23с.

На рис. 8, б наведено значення необхідного відхилення від заданого курсу ТНПА ψ_c , обчисленого САК для встановлення дистанції $d=d_3=2$ м, та фактичне відхилення від заданого курсу ψ .

Графіки перехідного процесу САК ТНПА в режимі когезії наведені на рис. 9.

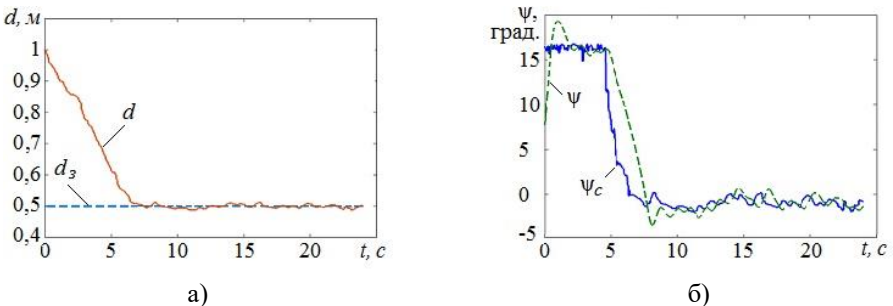


Рисунок 9 – Графіки перехідного процесу в режимі когезії:

а) дистанція між ТНПА і РКК; б) відхилення ТНПА від курсу

Тут задана дистанція $d_3=0,5\text{м}$, а на початку перехідного процесу ця дистанція становить приблизно 1 м. Позначення кривих відповідають позначенням на рис. 9.

Перехідний процес в режимі когезії також має аперіодичний характер. Перерегулювання становить 2 %, а тривалість перехідного процесу – 10 с.

Отримані результати підтвердили працездатність синтезованої САК АНПА-1.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне прикладне наукове завдання вдосконалення системи автоматичного керування безаварійним рухом одиночного автономного ненаселеного підводного апарата як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів при виконанні ними спільної підводної пошукової місії.

При цьому отримано наступні наукові та практичні результати.

1. На основі аналізу сучасного стану у галузі вітчизняної та світової підводної робототехніки показано, що одним з активно розроблюваних її напрямків є групове застосування АНПА як шлях до підвищення продуктивності пошукових підводних місій. Встановлено, що концептуально у розвитку методів групового застосування АНПА спостерігається розвиток двох напрямків автоматизації – розвиток індивідуальних характеристик АНПА як «агента» групи та розвиток методів керування груповим їх використанням. Показано, що для кожного із зазначених напрямків автоматизації характерним є наявність трьох основних рівнів розвитку автоматизації – базового рівня автоматизації окремого АНПА, локального рівня групового керування АНПА та глобального рівня автоматизації підводних пошукових місій.

2. На основі аналізу існуючих методів автоматичного керування групою АНПА сформульовано переліки типових задач автоматичного керування АНПА у режимах одиночного та групового застосування, до яких віднесено:

- удосконалення автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА;
- удосконалення процесів автоматизації групового пошуку як одного з базових алгоритмів керування групою пошукових АНПА;
- удосконалення процесів автоматизації керування окремими видами морських пошукових операцій.

3. **Удосконалено** структуру автоматичної системи керування рухом одиночного АНПА, що працює у складі групи підводних апаратів, шляхом включення до її складу двох нечітких регуляторів типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги – регулятора дистанції до навігаційно небезпечного сусіднього АНПА групи та регулятора курсу власного АНПА, що забезпечує безаварійний рух одиночного АНПА у складі групи.

4. Розроблено узагальнену структуру модельючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА, який містить чотири рівні автоматичного керування підводною місією групи АНПА – глобальний, локальний, базовий та виконавчий, що забезпечує моделювання

повного циклу підводної пошукової місії та утворює підґрунтя для реалізації комп'ютерної технології дослідження ефективності синтезованих систем автоматичного керування груповим рухом АНПА.

5. Запропоновано класифікацію методів групового застосування АНПА та отримано аналітичні залежності для оцінки необхідної кількості АНПА в групі для пошукової операції при наявності та відсутності обмежень технічного характеру.

6. Для підвищення продуктивності підводних пошукових операцій на віддалених морських акваторіях **удосконалено** процес керування безкіпажним морським комплексом у складі безкіпажного надводного судна з групою автономних ненаселених підводних апаратів на борту шляхом уведення десяти етапів його виконання, які охоплюють автоматично виконувани операції переходу безкіпажного надводного судна у задану акваторію, випуск групи АНПА та їх узгоджений рух у район пошуку, виконання пошукових операцій та повернення на безкіпажне надводне судно, а також повернення цього судна на базу.

7. **Вперше** розроблено систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів, яка реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію, синтезовано основні складові системи автоматичного керування – блоки сенсорів навігаційної обстановки, моделювання навігаційної обстановки, ідентифікації навігаційних загроз та бортового керуючого контролера, що виключає аварійне зіткнення сусідніх АНПА групи та розпад групи через втрату сенсорного контакту між ними.

8. На основі розробленої «Програми і методики проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи» запропоновано блок-схему алгоритму проведення морського натурального експерименту та виконано лабораторні дослідження системи акустичних сенсорів як основної складової системи навігаційної обстановки ведучого АНПА-1. У результаті проведення морських натурних випробувань перехідний процес для режиму адгезії тривав 23с, мав аперіодичний характер з перерегулюванням 6,7%, а перехідний процес для режиму когезії також мав аперіодичний характер з перерегулюванням 2 % та тривалістю 10 с, що підтверджує працездатність системи автоматичного керування макетом одиночного АНПА як «агента» групи, який працює в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

9. Теоретичні результати дисертаційних досліджень впроваджені у Державному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» (м. Миколаїв) при формуванні пропозицій щодо забезпечення ВМС ЗС України новими засобами морської робототехніки та у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України при підготовці магістрів за освітньо-професійною програмою «Морська робототехніка».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Burunina Zh.Yu., **Aloba L.T.**, Grudinina G.S. (2018). Mathematical modeling of the automatic control system for an autonomous underwater vehicle as a group agent.

Shipbuilding and Marine Infrastructure. № 1(9) – P. 29-35. DOI 10.15589/SMI.2018.01.04. **Фахове видання**

2. Zhanna Yu. Burunina, Andrii M. Voitasyk, **Leo T. Aloba**, Viktor I. Korytskyi, Andriy S. Sirivchuk, Aleksandr P. Klochkov. (2018). Experimental Study of Group Control Laws for an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle as a Group Agent. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. №2(10). Pages 116-126. DOI 10.15589/SMI.2018.02.12. **Фахове видання**

3. Blintsov V., **Aloba L.T.** (2019). Control Automation of Maritime Unmanned Complex with a Group of Autonomous Underwater Vehicles. *Eureka: Physics and Engineering*. Issue 2. Pages 30–42. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00940. **Фахове наукометричне видання Scopus**

4. **Алоба Л.Т.** (2019). Synthesis of Intelligent Automatic Control System of an Autonomous Underwater Vehicle as a Group Agent. // [Текст] / **Л. Т. Алоба**. «*Shipbuilding and Marine Infrastructure*» – Миколаїв: НУК. № 1 (11) – С.74-84. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).9](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).9). **Фахове видання**

5. **Leo T. Aloba**. (2019). Classification and features of search autonomous underwater vehicles control. /**Л.Т. Алоба**.// *Збірник наукових праць НУК*. №1(475). Pp.89-97. [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).12](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).12) **Фахове видання**

6. Блінцов В.С., **Алоба Л.Т.** (2020). Синтез системи автоматичного керування веденням автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи. / В. С. Блінцов, **Л. Т. Алоба**. *Збірник наукових праць НУК*. № 4(482). P. 53-67. **Фахове видання**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Блинцов В.С., **Алоба Л.Т.**, Тхы Д.Ф. (2016). Управление групповым движением автономных необитаемых подводных аппаратов. Створення та модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах : *збірник тез доповідей 16 науково-технічної конференції, 08-09 вересня 2016 р. / Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України*. – Чернігів : Видавець Брагинець О.В. С. 48-49.

8. Блинцов С.В., **Алоба Л.Т.**, Доан Ф.Т. (2016). Групповое применение автономных необитаемых подводных аппаратов для повышения эффективности морских работ. *Материалы XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління («Автоматика-2016»)*. – Суми : Сумський державний університет. С. 210-211.

9. **Алоба Л.Т.** (2018). Структура системы автоматического управления групповым движением АНПА. *Підводна техніка і технологія: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* : в 2 ч. – Миколаїв : НУК, 2018. – Ч. 1. – С. 46-52.

10. **Алоба Л.Т.** (2019). Синтез интеллектуальной системы автоматического управления АНПА как агентом группы. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT) : *збірка матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції*. Херсон : Херсонська державна морська академія. С. 224-227.

11. Blintsov V.S., **Aloba L.T.** (2019). Control automation of maritime unmanned complex with a group of autonomous underwater vehicles. *Інновації в суднобудування та океанотехніці: Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції*. в 2 ч.

– Ч. 2. – Миколаїв : НУК. С. 66-71.

12. **Алоба Л.Т.** (2019). Автоматизация группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами поискового типа. *Підводна техніка і технологія: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* : в 2 ч. – Миколаїв : НУК, 2019. – Ч. 1. – С. 36-44.

13. **Алоба Л.Т.** (2019). Программа и методика проведения натурных испытаний интеллектуальной системы автоматического управления автономным необитаемым подводным аппаратом как агентом группы. *Підводна техніка і технологія: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* : в 2 ч. – Миколаїв : НУК. Ч. 1. – С. 64-70.

14. **Алоба Л.Т.** (2020). Разработка специализированного моделирующего комплекса для исследования управляемого движения группы АНПА. *Інновації в суднобудування та океанотехніці: Матеріали ХІ Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 121-127.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

15. Блинцов В.С., **Алоба Л.Т.**, Тхы Д.Ф. (2016). Современные задачи группового управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов. *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв НУК. 3(465). С. 91-99. DOI 10.15589/jnn20160314

16. **Алоба Лео Тосин.** (2016). Задачи организации управления групповым движением автономных необитаемых подводных аппаратов в поисковых морских операциях. *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв НУК. 4(466). – С. 92-96. DOI 10.15589/jnn20160415

17. Блінцов С. В. (2017). Математичне моделювання динаміки автономного підводного апарата на плоскій циркуляції [Текст] /С. В. Блінцов, Г. С. Грудініна, **Л. Т. Алоба**. *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв : НУК. № 4. С.53-60. DOI 10.15589/jnn20170407

АНОТАЦІЯ

Алоба Л.Т. Автоматизація групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 «Системи та процеси керування». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне прикладне наукове завдання вдосконалення системи автоматичного керування безаварійним рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів при виконанні ними спільної підводної пошукової місії.

На основі аналізу існуючих методів автоматичного керування групою АНПА сформульовано переліки типових задач автоматичного керування АНПА у режимах одиночного та групового застосування. Удосконалено структуру автоматичної системи керування рухом одиночного АНПА, що працює у складі групи підводних

апаратів і забезпечує безаварійний рух одиночного АНПА у складі групи. Для підвищення продуктивності підводних пошукових операцій на віддалених морських акваторіях удосконалено процес керування безкіпажним морським комплексом у складі безкіпажного надводного судна з групою автономних ненаселених підводних апаратів на борту.

Вперше розроблено систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів, яка реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію, синтезовано основні складові системи автоматичного керування – блоки сенсорів навігаційної обстановки, моделювання навігаційної обстановки, ідентифікації навігаційних загроз та бортового керуючого контролера, що виключає аварійне зіткнення сусідніх АНПА групи та розпад групи через втрату сенсорного контакту між ними.

Ключові слова: автономний ненаселений підводний апарат, система автоматичного керування, режими адгезії, когезії та вирівнювання.

АННОТАЦІЯ

Алоба Л.Т. Автоматизация группового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами поискового типа. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 «Системы и процессы управления». – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2021. Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2021

В диссертационной работе решена актуальная прикладная научная задача усовершенствования системы автоматического управления безаварийным движением одиночного АНПА как «агента» группы в условиях навигационной близости других подводных аппаратов при выполнении ими общей подводной поисковой миссии.

На основе анализа существующих методов автоматического управления группой АНПА сформулированы перечни типовых задач автоматического управления АНПА в режимах одиночного и группового применения. Усовершенствована структура автоматической системы управления движением одиночного АНПА, который работает в составе группы подводных аппаратов и обеспечивает безаварийное движение одиночного АНПА в составе группы. Для повышения производительности подводных поисковых операций на отдаленных морских акваториях усовершенствован процесс управления безэкипажным морским комплексом в составе безэкипажного надводного судна с группой автономных необитаемых подводных аппаратов на борту.

Впервые разработана система автоматического управления ведомым АНПА как «агентом» группы подводных аппаратов, которая реализует основные режимы группового движения – выравнивание, адгезию и когезию, синтезированы основные составляющие системы автоматического управления – блоки сенсоров навигационной обстановки, моделирования навигационной обстановки,

идентификации навигационных угроз и бортового управляющего контроллера, что исключает аварийное столкновение соседних АНПА группы и распад группы из-за потери сенсорного контакта между ними.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система автоматического управления, режимы адгезии, когезии и выравнивания.

ANNOTATION

Aloba L.T. Group control automation of search-type autonomous underwater vehicles. - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (PhD), in specialty 05.13.03 – “Control Systems and Processes”. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, 2021. "Lviv Polytechnic" National University, Lviv, 2021.

The dissertation solves the relevant applied scientific task of improving the accident-free motion automatic control system of a single autonomous underwater vehicle as a group "agent" in conditions of navigational proximity of other autonomous underwater vehicles when performing a joint underwater search mission.

For a single underwater vehicle as a group "agent" of underwater vehicles performing a joint mission, its mathematical model main components are structured and composed based on well-known publications, which include models of information system and an automatic control system, a propulsion and steering complex and the underwater vehicle external hull, as well as the model of external disturbances of hydrodynamic nature acting on its external hull. Also, a mathematical model and structure of the automatic motion control system of a single autonomous underwater vehicle operating in the group has been developed. The developed control system consists of two fuzzy regulators of the Mamdani type with defuzzification of the control variable by the center of gravity method: a distance regulator and a course regulator. The results obtained provide the accident-free motion of a single underwater vehicle in the group.

A modeling complex generalized structure has been developed to study the automatic control system effectiveness of a group of autonomous underwater vehicles performing a joint underwater search mission. The complex includes four levels of the group's underwater mission automatic control - global, local, basic and executive, which provide modeling of the underwater search mission full cycle, which forms the basis for the implementation of computer technology for studying the effectiveness of the underwater vehicles' synthesized group control systems.

The relevant tasks of the autonomous underwater vehicles group motion automation have been formulated – the task of underwater vehicles group automatic motion control system selected to perform a specified underwater mission, which provides underwater vehicles' coordinated motions on assigned trajectories and the task of control system synthesis of a single underwater vehicle as a "group" agent in conditions of navigational proximity of other underwater vehicles of the group.

To increase the underwater search operation productivity in remote sea areas, the application of Maritime Unmanned Complex, consisting of an unmanned surface vessel with a group of search autonomous underwater vehicles on board, is proposed. The maritime underwater search control process mission has been improved with the help of

such a complex consisting of ten stages has been developed, which includes unmanned surface vessel automatic transition operations to a given water area, automatic release of a group of autonomous underwater vehicles and their coordinated motion into the search area, performing search operations and returning to unmanned surface vessel, as well as automatic return of this vessel to base.

In the dissertation, for the first time, a generalized automatic control system operation algorithm of the i -th follower autonomous underwater vehicle as a group "agent" of the underwater vehicles performing a joint mission was developed, and the synthesis of such underwater vehicle automatic control system, which implements the group motion main modes – alignment, adhesion and cohesion. Based on the utilization of fuzzy logic theories, the main components of the automatic control system are synthesized – blocks of the Navigation Environment Sensors, Navigation Situation Model, Navigation Threat Identifier and on-board controller. As a typical example of the use of fuzzy logic, the Navigation Threat Identifier synthesis is given, which generates recommendations maneuvers for the i -th follower underwater vehicle maneuvers to avoid single navigation threats in the directions controlled by this underwater vehicle sensors

Based on the feature analysis of organizing and conducting the marine full-scale experiment on the automatic control system operability of the autonomous underwater vehicle as a group "agent", a program and methodology for conducting its field tests was developed, a generalized algorithm block diagram for conducting a marine full-scale experiment was proposed, and the acoustic sensor system laboratory research was carried out as the underwater vehicle navigation system main component. The results of the conducted sea full-scale tests of the underwater vehicle model automatic control system in the adhesion, cohesion and sinusoidal plane motion modes confirmed its efficiency.

Keywords: autonomous underwater vehicle, automatic control system, adhesion, cohesion and alignment modes.

Підписано до друку 05.03.2021р.
Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 прим.