

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Алоба Лео Тосін

УДК 681.5 : 629.584

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ
НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ ПОШУКОВОГО ТИПУ

05.13.03 – системи та процеси керування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Алоба Лео Тосін

Науковий керівник Блінцов Володимир Степанович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2021

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 на основі аналізу сучасного стану у галузі підводної робототехніки показано, що одним з активно розроблюваних її напрямків є групове застосування автономних ненаселених підводних апаратів. У світовій практиці цей прикладний напрямок робототехніки отримав назву «Collective Cognitive Robots» (CoCoRo, колективні когнітивні апарати-роботи) і сьогодні знаходиться на початковій стадії розробки. Аналіз сучасних методів групового застосування автономних ненаселених підводних апаратів свідчить про переважне їх застосування для проведення пошукових підводних робіт, а також наукових та природоохоронних досліджень, які містять пошукову складову. Концептуально у розвитку методів групового використання таких апаратів спостерігається розвиток двох напрямків автоматизації – розвиток індивідуальних характеристик окремого підводного апарата як «агента» групи та розвиток методів керування груповим застосуванням підводних апаратів. Для кожного із зазначених напрямків автоматизації характерним є наявність трьох основних рівнів розвитку автоматизації – базового рівня автоматизації окремого автономного ненаселеного підводного апарата, локального рівня групового керування підводними апаратами та глобального рівня автоматизації підводних пошукових місій із застосуванням групи автономних ненаселених підводних апаратів.

У дисертації на основі аналізу сучасних підходів до групового керування автономних ненаселених підводних апаратів встановлено три основні способи їх використання – ройовий, зграйний та колективний. Показано, що спільну наукову проблему автоматизації процесів групового використання підводними апаратами можна представити у вигляді чотирьох відносно незалежних задач: формулювання мети (кінцевого продукту) підводної місії, яку необхідно виконати групі підводних апаратів шляхом одночасного виконання низки підводних робіт; розробка програми автоматичного виконання підводної місії групою підводних апаратів (стратегії керування); керування паралельними процесами виконання розробленої програми виконання підводної місії; автоматичне керування окремим підводним апаратом як «агентом» групи.

Виконано аналіз способів організації керування групою пошукових автономних ненаселених підводних апаратів, у результаті чого виділено два основні способи – централізоване і децентралізоване керування групою автономних ненаселених підводних апаратів, а також додатковий спосіб – напівдецентралізоване керування, який поєднує деякі властивості двох попередніх основних способів керування групою.

У дисертації виконано аналіз існуючих методів автоматичного керування групою автономних ненаселених підводних апаратів, сформульовано переліки типових задач керування ними у режимах одиночного та групового застосування при плаванні в складних навігаційних умовах, перелік задач навігаційного забезпечення одиночного підводного апарата та групового їх застосування. Як результат аналізу сучасного стану в області автоматизації Co-Co-Ro – технологій сформульовано головні задачі дисертаційного дослідження:

- удосконалення автоматичного керування рухом одиночного автономного ненаселеного підводного апарата як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів групи;

- удосконалення процесів автоматизації групового пошуку як одного з базових алгоритмів керування групою пошукових автономних ненаселених підводних апаратів;

- удосконалення процесів автоматизації керування окремими видами морських пошукових операцій.

Для одиночного підводного апарата як «агента» групи підводних апаратів, що виконують спільну місію, структуровано та складено на основі відомих публікацій основні складові його математичної моделі, до складу якої увійшли моделі інформаційної системи та системи автоматичного керування, рушійно-стернового комплексу та зовнішнього корпусу підводного апарата, а також модель зовнішніх збурень гідродинамічної природи, які діють на його зовнішній корпус. Також розроблено математичну модель та структуру автоматичної системи керування рухом одиночного автономного ненаселеного підводного апарата, що працює у складі групи. Розроблена система керування складається з двох нечітких регуляторів типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги: регулятора дистанції та регулятора курсу. Отримані результати забезпечують безаварійний рух одиночного підводного апарата у складі групи.

Розроблено узагальнену структуру моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою автономних ненаселених підводних апаратів, які виконують спільну підводну пошукову місію. Комплекс містить чотири рівні автоматичного керування підводною місією групи – глобальний, локальний, базовий та виконавчий, які забезпечують моделювання повного циклу підводної пошукової місії, що утворює підґрунтя для реалізації комп'ютерної технології дослідження ефективності синтезованих систем групового керування підводними апаратами. На основі огляду методів експериментального дослідження систем автоматичного керування обрано морські натурні випробування як форму практичної перевірки працездатності систем автоматичного керування рухом одиночного підводного апарата як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів групи.

Запропоновано класифікацію методів групового застосування автономних ненаселених підводних апаратів, що охоплює плоский прямолінійний і

криволінійний рух підводних апаратів, а також їх груповий просторовий рух. Сформульовано множину прикладних науково-технічних завдань по створенню систем централізованого й децентралізованого керування групою підводних апаратів, що виконують спільну місію. Отримано аналітичні залежності для оцінки необхідної кількості підводних апаратів у групі для пошукової морської операції при наявності та відсутності обмежень технічного характеру.

Сформульовано актуальні завдання автоматизації групового руху автономних ненаселених підводних апаратів – завдання синтезу системи автоматичного керування рухом групи підводних апаратів, відібраних для виконання вказаної підводної місії, що забезпечує узгоджені рухи підводних апаратів за призначеними траєкторіями та завдання синтезу системи автоматичного керування одиночним підводним апаратом як «агентом» групи в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів групи.

Для підвищення продуктивності підводних пошукових операцій на віддалених морських акваторіях запропоновано використовувати безекіпажний морський комплекс у складі безекіпажного надводного судна з групою автономних ненаселених підводних апаратів на борту. Показано актуальність прикладного наукового завдання автоматизації керування таким комплексом, а також необхідність удосконалення системи автоматичного керування окремим підводним апаратом як «агентом» групи, який працює в умовах невизначеності. Удосконалено процес керування морською підводною пошуковою місією за допомогою такого комплексу у складі десяти етапів, які охоплюють операції автоматичного переходу безекіпажного надводного судна у задану акваторію, автоматичний випуск групи автономних ненаселених підводних апаратів та їх узгоджений рух у район пошуку, виконання пошукових операцій, повернення на безекіпажне надводне судно та автоматичне повернення цього судна на базу.

У дисертації вперше розроблено узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування i -м веденим автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи підводних апаратів, що виконують спільну місію, та виконано синтез системи автоматичного керування таким

підводним апаратом, яка реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію. На основі залучення теорії нечіткої логіки синтезовано основні складові системи автоматичного керування – блоки сенсорів навігаційної обстановки, моделювання навігаційної обстановки, ідентифікації навігаційних загроз та бортового керуючого контролера. У якості типового прикладу застосування нечіткої логіки наведено синтез ідентифікатора навігаційних загроз, який генерує рекомендації щодо маневрів *i*-го веденого підводного апарата для ухилення від одиночних навігаційних загроз за напрямками, контрольованими сенсорами цього підводного апарата.

На основі аналізу особливостей організації та проведення морського натурного експерименту щодо працездатності системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи розроблено програму і методику проведення її натурних випробувань, запропоновано блок-схему узагальненого алгоритму проведення морського натурного експерименту та виконано лабораторні дослідження системи акустичних сенсорів як основної складової системи навігаційної обстановки підводного апарата.

Проведені морські натурні випробування системи автоматичного керування макетом підводного апарата в режимах адгезії, когезії та синусоїдального плоского руху підтвердили її працездатність.

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

ABSTRACT

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

Dissertation for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.03 “Control systems and processes”. – Admiral Makarov National

University of Shipbuilding, Nikolaev, 2020. "Lviv Polytechnic" National University, Lviv, 2020.

In the dissertation work, based on the state-of-the-art analysis in the sphere of underwater robotics, it is shown that one of its actively developed directions is the group application of autonomous underwater vehicles. In world practice, this applied direction of robotics has received the name "Collective Cognitive Robots" (CoCoRo) and is currently at the early stage of development. Analysis of modern methods of autonomous underwater vehicles group application indicates their predominant use for conducting underwater search operations, as well as scientific and environmental research containing the search component. Conceptually, in the development of autonomous underwater vehicles' group application methods, the development of two automation directions is observed - the development of the individual characteristics of a single underwater vehicle as a group "agent" and the development of underwater vehicles' group application control methods. Each of these automation directions is characterized by the presence of three main levels of automation development - the basic level of automation of an individual autonomous underwater vehicle, the local level of group control of underwater vehicles and the global level of automation of underwater (maritime) search operations using a group of autonomous underwater vehicles.

In the dissertation, based on the analysis of modern approaches to group control of autonomous unmanned underwater vehicles, three main methods of their use are established - swarm, flock and collective. It is shown that the joint scientific problem of underwater vehicles' group application process automation can be represented in the form of four relatively independent tasks: the formulation of the underwater mission goal (end product), which must be performed by the group of underwater vehicles by simultaneously performing a number of underwater operations; development of a program for the automatic execution of the underwater mission by a group of underwater vehicles (control strategy); control of developed

program execution parallel processes for underwater mission implementation; automatic control of the individual underwater vehicle as a group "agent".

The analysis of the search autonomous underwater vehicles group control organization methods has been carried out, as a result of which two main methods have been identified - centralized and decentralized autonomous underwater vehicles group control, as well as an additional method - semi-decentralized control, which combines some properties of the two previous main group control methods.

The dissertation analyzes the existing autonomous underwater vehicles' group automatic control methods, formulates lists of typical control tasks for them in modes of single and group application when moving in difficult navigation conditions, a list of tasks for navigation support of a single underwater vehicle and their group application. As a result of the analysis of the state-of-the-art in the field of Co-Co-Ro technology automation, the main tasks of the dissertation research are formulated:

- improvement of the automatic motion control of a single autonomous underwater vehicle as a group "agent" in conditions of navigational proximity of other underwater vehicles of the group;
- improvement of the group search automation processes as one of the basic group control algorithms of search autonomous underwater vehicles;
- improvement of control automation processes of certain types of maritime search operations.

For a single underwater vehicle as a group "agent" of underwater vehicles performing a joint mission, the main components of its mathematical model 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 an 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 generalized structure of a modeling complex has been developed to study the effectiveness of the automatic control system of a group of autonomous unmanned underwater vehicles performing a joint underwater search mission. The complex includes four levels of automatic control of the group's underwater mission - global, local, basic and executive, which provide modeling of the full cycle of an underwater search mission, forms the basis for the implementation of computer technology for studying the effectiveness of synthesized group control systems for underwater vehicles. Based on the review of experimental research methods for AUV automatic control systems, sea full-scale tests were selected as a form of practical operability verification of the automatic control systems for a single AUV as a group "agent" in conditions of navigational proximity of other underwater vehicles of the group.

The classification of group application methods of autonomous underwater vehicles is proposed, which covers flat rectilinear and curvilinear motion of the underwater vehicles, as well as their group spatial motion. A set of applied scientific and technical tasks for the creation of centralized and decentralized control systems of a group of underwater vehicles performing a joint mission are formulated. Analytical dependences are obtained to estimate the required amount of AUVs in the group for search maritime operation in the presence and absence of technical restrictions.

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 synthesis of control system of a single underwater vehicle as a "group" agent in conditions navigational proximity of other underwater vehicles.

To increase the productivity of underwater search operations in remote sea areas, it is proposed to use an unmanned marine complex consisting of an unmanned surface vessel with a group of search autonomous underwater vehicles on board. The

relevance of the control automation applied scientific task of such a complex is shown, as well as the need to improve the automatic control system of an individual underwater vehicle as a group "agent" that operates under conditions of uncertainty. 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 operations of automatic transition of unmanned surface vessel 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 the 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 unmanned underwater vehicle as an "agent" of a group of underwater vehicles performing a joint mission was developed, and the synthesis of an automatic control system of such underwater vehicle, which implements the main modes of group motion - alignment, adhesion and cohesion. Based on the involvement of fuzzy logic theories, the main components of the automatic control system are synthesized - blocks of sensors of the navigation environment, modeling of the navigation situation, identification of navigation threats and on-board controller. As a typical example of the use of fuzzy logic, the synthesis of a navigational hazard identifier is given, which generates recommendations for maneuvers of the i -th follower autonomous underwater vehicle to avoid single navigation threats in the directions controlled by this underwater vehicle sensors.

Based on the feature analysis of organizing and conducting a 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 block diagram of a generalized algorithm for conducting a marine full-scale experiment was proposed, and the acoustic sensor system laboratory research was carried out as the main component of the underwater vehicle navigation system. The conducted sea full-scale tests of the underwater vehicle model

automatic control system in the modes of adhesion, cohesion and sinusoidal plane motion confirmed its efficiency.

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

Список публікацій здобувача

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. Voityasyk, **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.** Synthesis of Intelligent Automatic Control System of an Autonomous Underwater Vehicle as a Group Agent. (2019). // [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. DOI: [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 веденим автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи. / В. С. Блінцов, **Л. Т. Алоба** // *Збірник наукових праць НУК*. № 4(482). Р. 89-97. **Фахове видання**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. 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.

2. 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.

3. **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.*

4. **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.

5. 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.

6. **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.

7. **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.

8. **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

1. 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

2. **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

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
1 СУЧАСНІ ПІДВОДНІ ПОШУКОВІ МІСІЇ ТА ЗАВДАННЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ	23
1.1 Загальна характеристика автономних ненаселених підводних апаратів, призначених для виконання пошукових місій у режимі групового застосування	23
1.2 Сучасні методи групового застосування АНПА	27
1.3 Способи організації керування групою пошукових АНПА	35
1.4 Аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА	40
1.5 Актуальні задачі автоматизації пошукових підводних операцій і постановка задачі дослідження	48
Висновки до розділу 1	50
2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ	53
2.1 Попередні зауваження	53
2.2. Основні складові математичної моделі одиночного АНПА групи	54
2.3 Математичне моделювання динаміки одиночного АНПА як об'єкта керування	56
2.4 Математичне моделювання керованого руху одиночного АНПА як «агента» групи	67
2.5 Короткий огляд методів експериментального дослідження систем автоматичного керування АНПА	86
Висновки до розділу 2	89

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОВИМ РУХОМ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ПОШУКОВОГО ТИПУ	91
3.1 Сучасні групові пошукові підводні місії АНПА та особливості автоматизації їх виконання	91
3.2 Автоматизація керування морським безкіпажним комплексом із групою пошукових АНПА	101
3.3. Синтез системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи	107
Висновки до розділу 3	134
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЯК «АГЕНТОМ» ГРУПИ	136
4.1 Короткий опис організації морського натурального експерименту	136
4.2 Основні результати морських натурних випробувань САК АНПА	145
4.3 Аналіз результатів морських натурних випробувань САК АНПА	147
Висновки до розділу 4	150
ВИСНОВКИ	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
ДОДАТКИ	171
Додаток А. Документи, які підтверджують впровадження результатів	172
Додаток Б. Основні залежності між системами координат та кінематичні параметри АНПА	175
Додаток В. Програма і методика морського натурального експерименту	184
Додаток Г. Перелік опублікованих праць за темою дисертації	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АНПА	- автономний ненаселений підводний апарат
БКК	- бортовий керуючий контролер
БСК	- базова система координат
ГК	- гідродинамічне крило
ЕД	- електричний двигун
ЗК	- зовнішній корпус
ЗСК	- зв'язана система координат
ІНЗ	- ідентифікатор навігаційних загроз
МБК	- морський безекіпажний комплекс
ММ	- математична модель
МНО	- модель навігаційної обстановки
РГАБ	- радіогідроакустичний буй
РСК	- рушійно-стерновий комплекс
САК	- система автоматичного керування
СНС	- сенсори навігаційної системи
ХО	- хвостове оперення

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) стають 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 й 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 роботів 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 й обумовлює актуальність дисертаційного дослідження.

Об'єктом дослідження є керований автоматично 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 окремими блоками 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 включене 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 3 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 автоматичної системи керування АНПА, що працює як агент у сукупності інших об'єктів;

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

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

у статті [6] – узагальнений процес та алгоритм функціонування системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи підводних

апаратів, який реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, отриманих в дисертації, доповідались і обговорювались на 4 міжнародних, 2 всеукраїнських з міжнародною участю та 1 науково-технічній конференціях: XXIII Міжнародній конференції з автоматичного управління («Автоматика-2016») (м. Суми, 2016); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT) (м. Херсон, 2019); X та XI міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2019 та 2020); IX Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2018 та 2019); 6-й науково-технічній конференції «Створення та модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах» (м. Черкаси, 2016).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 203 сторінки, у тому числі 137 сторінки основного тексту, 5 таблиць, 49 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, «Роботизовані технології захисту акваторії», номер державної реєстрації 0118U000036D.

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

професійною програмою «Морська робототехніка» 141 спеціальності – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1 СУЧАСНІ ПІДВОДНІ ПОШУКОВІ МІСІЇ ТА ЗАВДАННЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ

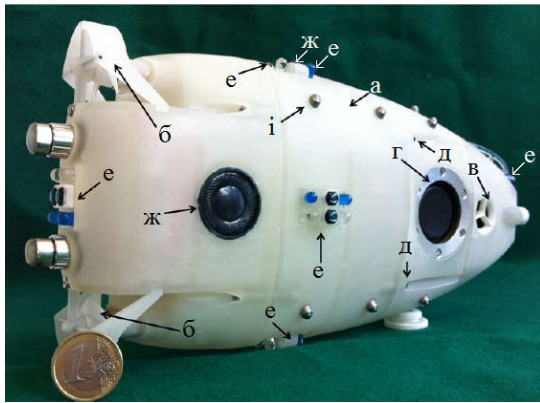
1.1 Загальна характеристика автономних ненаселених підводних апаратів, призначених для виконання пошукових місій у режимі групового застосування

Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, в англomовній літературі – *autonomous underwater vehicles, AUV*) відносяться до високоефективного виду морської робототехніки та широко використовуються для виконання пошукових та обстежувальних робіт на всьому діапазоні глибин Світового океану [1-3]. Основні області їх застосування – океанографія, охорона навколишнього середовища, геологорозвідка, морська газо- і нафтовидобувна промисловість, протимінні операції та ін. [4-6].

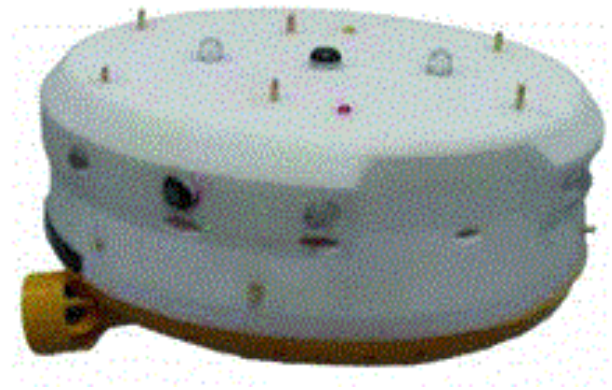
Збільшення обсягів підводних робіт і постійне вдосконалювання технічних характеристик АНПА стимулюють новий напрямок їхнього застосування – одночасне групове використання на великих акваторіях (в англomовній літературі – *multi-agent systems, MAS*). Це забезпечує найбільшу ефективність підводних робіт – максимальну продуктивність пошукових операцій і максимальну вірогідність одержуваних даних про підводне середовище через паралельні у часі виміри його параметрів [7, 8].

Для таких робіт сьогодні створюються спеціальні види автономних ненаселених підводних апаратів, які призначені для проведення пошукових, науково-дослідних, природоохоронних та і інших підводних робіт у рамках реалізації групових технологій, коли збір даних про морське середовище або підводний пошук виконуються одночасно декількома АНПА за спільною програмою [9-12].

На рис. 1.1 наведено приклади малогабаритних АНПА, призначених для виконання пошукових підводних робіт у режимі групового застосування.



а



б



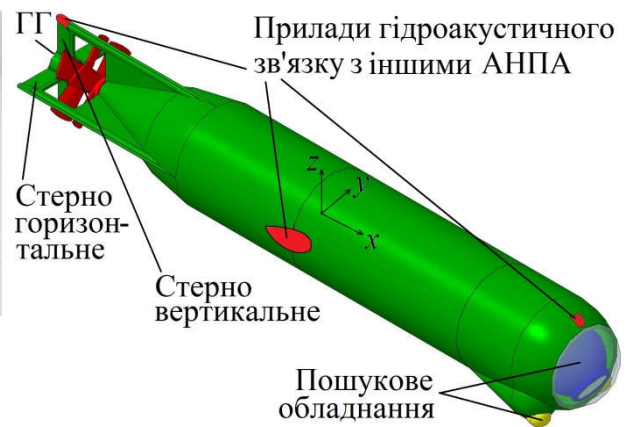
в



г



д



е

Рисунок 1.1 – Сучасні малогабаритні АНПА, призначені для виконання пошукових підводних робіт у режимі групового застосування: а – “The Jeff Plattform” (ICT, EU-FP7); б – “The Lily Plattform” (ICT, EU-FP7); в – “EcoSUB μ & EcoSUB m (“Planet Ocean Ltd”, University of Southampton, UK); г – “VERTEX” (“Hydromea”, USA); д – “АНПА-М” (СПДМТУ, Росія); е – «Сканер» (проект Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова)

Розглянемо коротко особливості побудови типового АНПА, який відображає специфіку групового застосування.

Проект “The Jeff Plattform” являє собою мікро-АНПА, який спеціально спроектовано для групового застосування з метою проведення масштабних екологічних досліджень водного середовища [13]. На рис. 1.1,а показано основні конструктивні елементи АНПА: а – зовнішній корпус (гідродинамічний обтікач); б – кормові рушії (гребні гвинти); в – лаговий рушій (гребний гвинт); г – система плавучості; д – конектори для екологічних сенсорів; е – система оптичного зв’язку; ж – гідрофон; з – гучномовець акустичної системи зв’язку; і – електроди для потенційного польового зв’язку (пронумеровано один).

Таким чином, кожний АНПА, як «агент» групи, оснащений трьома системами для інформаційного обміну з іншими підводними апаратами, що робить його ефективним елементом групи з надійною системою комунікацій.

Схожим за принципом дії є також інший продукт європейського проекту EU-FP7 – АНПА “The Lily Plattform” [9].

Перспективними для України є побудова та використання у пошукових підводних місіях АНПА проекту «Сканер» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, який розробляється в інтересах Державної служби України з надзвичайних ситуацій [14]. Такий АНПА у якості пошукового приладового забезпечення має фото- та відео систему, а також прилади гідроакустичного пошуку підводних об’єктів. АНПА проекту «Сканер» має один гребний гвинт (ГГ) контрроторного обертання та хвостове оперення у вигляді вертикального стерна (для керованого руху у горизонтальній площині та горизонтального стерна для зміни глибини руху). Зв’язок з іншими АНПА групи забезпечується приладами гідроакустичного зв’язку. Саме АНПА цього проекту розглядається у дисертації як об’єкт керування.

Одним з головних питань по організації групового застосування АНПА є оперативне керування деякою множиною (групою) апаратів з метою їхнього

погодженого руху у водному середовищі для досягнення загальної мети (в англійській літературі – виконання підводної місії, Underwater Mission, UM).

Вивчення вітчизняної та зарубіжної літератури свідчить, що групове застосування АНПА знаходиться на початковій стадії свого розвитку [15, 16]. Причому, розробляються як апаратні засоби АНПА, так і їх системи автоматичного керування (САК) такими об'єктами [17, 18].

У світовій практиці цей прикладний напрямок робототехніки отримав назву «Collective Cognitive Robots» (CoCoRo, колективні когнітивні апарати-роботи) [19, 20]. Причому, ключові розробки у цьому напрямку проводяться як міжнародні проекти у вигляді європейських грантів та міжуніверситетських програм [21].

Вказаний підхід ґрунтується на застосуванні принципів спільних дій, які спостерігаються у живій природі (рух пташиних зграй, косяків риби та ін.) й отримав абревіатуру SWARM (Small World Autonomous Robots for Micro-manipulation – автономні роботи малого світу для мікрomanipуляцій).

Для світової науки, як відзначається у [22], цей напрямок є відносно новим. Однак, його перспективність визначається перевагами групового виконання пошукових та обстежувальних підводних робіт у порівнянні з роботами, які виконуються одиночними АНПА з централізованим керуванням.

Разом з тим, дослідники вказують на об'єктивні труднощі, які стоять на шляху промислового використання груп АНПА у морських дослідженнях. До таких труднощів, у першу чергу, відносяться наступні:

- поведінку групи АНПА важко передбачити у реальних умовах експлуатації, оскільки вона формується у результаті локальної взаємодії багатьох «агентів» групи – окремих АНПА;

- існуючі на сьогодні засоби підводного зв'язку поки не у повній мірі відповідають вимогам до систем інформаційного обміну між окремими АНПА групи;

- експериментальна перевірка працездатності групи АНПА є занадто складним практичним завданням, оскільки її організація у реальних виробничих умовах є ризикованою з-за можливої втрати окремих АНПА;

- відсутність достовірних технологій комп'ютерного моделювання процесів групового застосування АНПА, що обумовлює неточність його результатів при дослідженні алгоритмів групового керування такими підводними апаратами.

Таким чином, у сучасній закордонній літературі є відомості про групове застосування АНПА, однак, ця інформація носить рекламно-ознайомлювальний характер і не дає цільного уявлення про розв'язок наукової задачі організації руху й оперативного керування для групи АНПА.

1.2 Сучасні методи групового застосування АНПА

Як свідчить світовий досвід [23-25], до головних підводних робіт, які найбільш ефективно виконуються з груповим використанням АНПА, у першу чергу, відносяться наступні:

- пошукові роботи – пошук затонулих об'єктів та підводних аномалій, викликаних природними процесами та антропогенними впливами на водне середовище;

- наукові дослідження – вивчення гідрофізичних і гідрохімічних властивостей водного середовища;

- природоохоронні дослідження – вивчення екологічного стану водного середовища та його змін у часі (процеси забруднення води, наслідки глобального потепління на планеті тощо);

- обстежувальні та інспекційні роботи – детальне вивчення стану підводних об'єктів та його документування;

- роботи воєнного спрямування – інформаційне забезпечення діяльності військово-морських флотів держави.

Зазначимо, що пошукові підводні роботи є найбільш розповсюдженими при виконанні підводних місій, оскільки вони є невід’ємною складовою більшості наукових, природоохоронних та інших місій.

Укрупнено вказані методи наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Основні методи групового використання АНПА

Слід зазначити, що вказані методи мають суттєво різні вимоги як до кількості АНПА в групі та до їх функціональної організації, так і до індивідуальних технічних характеристик окремих АНПА. Тому концептуально у розвитку методів групового використання АНПА (CoCoRo – технологій) спостерігається розвиток двох напрямків автоматизації [21, 22]:

- розвиток індивідуальних характеристик АНПА як «агента» групи C_{Ag} ;
- розвиток методів керування груповим застосуванням АНПА C_{Gr} .

Для обох напрямків характерними на цей час є три основні рівні розвитку автоматизації:

- базовий рівень B автоматизації окремого АНПА;
- локальний рівень L групового керування АНПА;
- глобальний рівень G автоматизації підводних пошукових операцій.

Основні рівні розвитку індивідуальних та групових характеристик АНПА як об'єктів керування показані на рис. 1.3. Розглянемо їх більш детально.

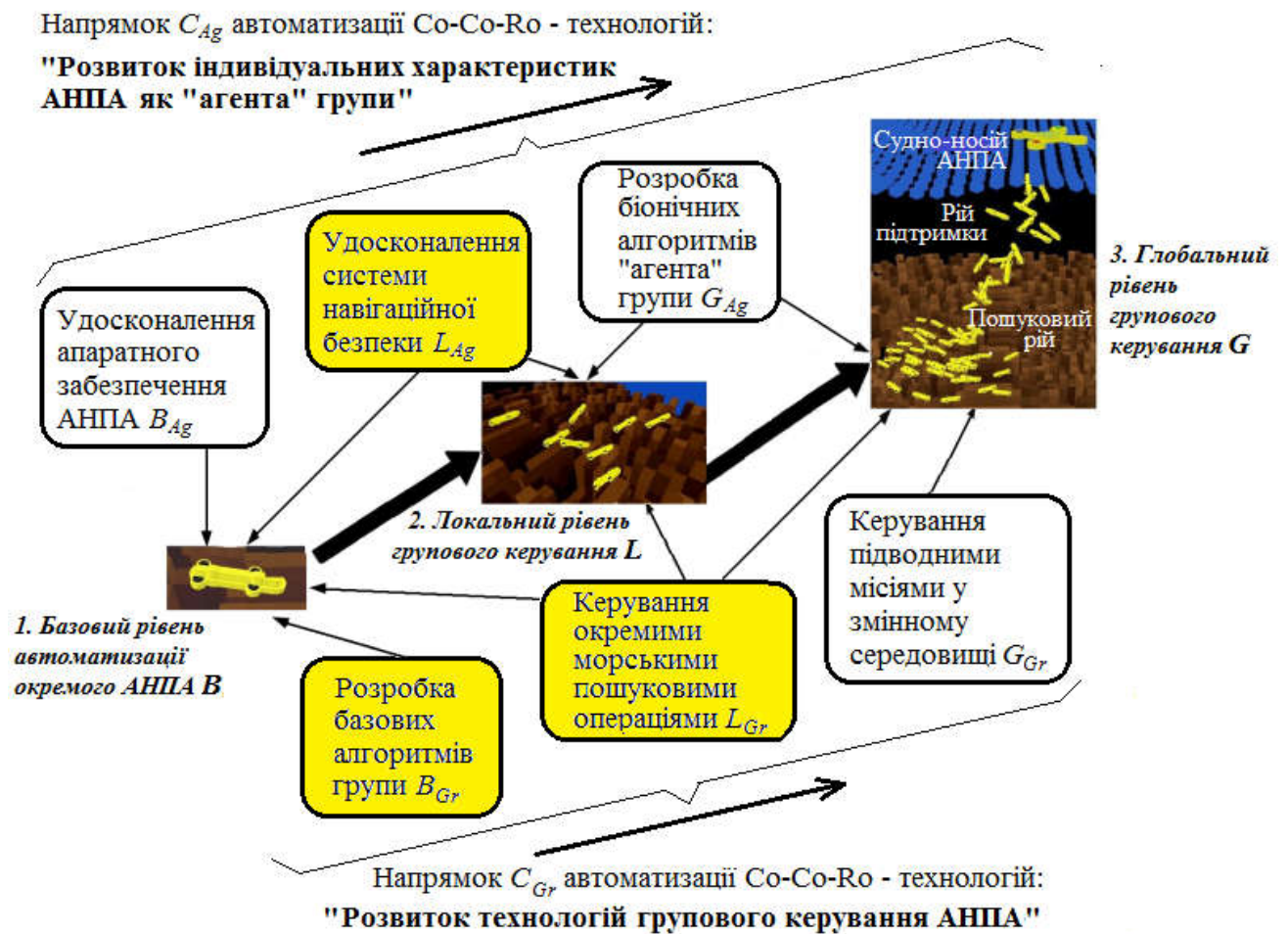


Рисунок 1.3 – Основні рівні розвитку індивідуальних та групових характеристик АНПА як об'єктів керування

Перший напрямок автоматизації C_{Ag} на базовому рівні автоматизації B ґрунтується на інноваційних технічних рішеннях B_{Ag} щодо удосконалення апаратного забезпечення АНПА як об'єкта автоматизації. Він передбачає застосування спеціальних технологій для побудови АНПА, що приводяться в рух програмно керованими гребними гвинтами, мають відповідні системи автоматичного забезпечення заданої плавучості.

Зазвичай, такі АНПА оснащуються також розвиненими системами самодіагностики та відновлення, що суттєво підвищує їх надійність як «агентів» групи.

На локальному рівні автоматизації L напрямок автоматизації C_{Ag} містить заходи L_{Ag} щодо забезпечення навігаційної безпеки просторового руху АНПА у складі групи. Для орієнтації під водою, безаварійного руху та розпізнавання об'єктів пошуку такі апарати мають розвинену систему сенсорів – оптичних, гідроакустичних, магнітометричних тощо.

Важливою складовою першого напрямку розвитку АНПА C_{Ag} на глобальному рівні G автоматизації підводних пошукових методів є розвиток програмного забезпечення, яке включає розробку базових алгоритмів їх поведінки у складі групи та розробку алгоритмів організації групового руху за біонічними аналогами G_{Ag} (наприклад, поведінка зграї птахів чи риб).

Таким чином, для першого напрямку розвитку АНПА C_A , який забезпечує розвиток індивідуальних технічних характеристик АНПА як основного виконавчого інструменту пошукової підводної місії («агента» групи), можна виділити наступну множину задач автоматизації:

$$C_{Ag} = \{B_{Ag}; L_{Ag}; G_{Ag}\}. \quad (1.1)$$

Аналіз сучасного стану розвитку вітчизняної підводної робототехніки [26] свідчить, що у теоретичному плані найбільшу актуальність має задача автоматизації L_{Ag} , оскільки успішний її розв'язок має підвищити безпеку просторового руху АНПА у складі групи. Тому у подальшому в дисертації розв'язується задача автоматизації L_{Ag} (на рис. 1.3. виділена кольором).

Другий напрямок C_{Gr} автоматизації розвитку методів групового використання АНПА – розвиток методів керування їхнім груповим застосуванням – передбачає розв'язок наступних типових дослідницьких задач:

- розробку базових алгоритмів роботи АНПА в групі B_{Gr} (наприклад, керування груповим пошуком підводного об'єкта чи узгодженим рухом групи АНПА при виконанні природоохоронного обстеження водного середовища з метою виявлення антропогенного забруднення);

- розробку базових алгоритмів керування окремими видами морських пошукових операцій L_{Gr} , які б включали весь перелік фаз морських робіт, починаючи від організації випуску групи АНПА в море і закінчуючи їх поверненням після завершення пошукової місії;

- розробку методів керування групою АНПА з умовах змінного середовища G_{Gr} (дії зовнішніх збурень природного чи антропогенного походження).

Тоді для другого напрямку C_G використання Co-Co-Ro – технологій множини основних задач автоматизації можна представити як:

$$C_{Gr} = \{B_{Gr}; L_{Gr}; G_{Gr}\}. \quad (1.2)$$

Для сучасного етапу розвитку вітчизняної підводної робототехніки до першочергових задач автоматизації групового керування АНПА слід віднести задачі B_{Ag} та L_{Ag} , оскільки вони знаходяться на початкових етапах розвитку методів керування груповим застосуванням АНПА C_{Gr} (на рис. 1.3. виділені кольором).

У зв'язку з цим у подальших дисертаційних дослідженнях за напрямком C_{Gr} розглядаються задачі B_{Ag} та L_{Ag} .

Зазначимо також, що описана вище концепція розвитку CoCoRo-технологій дає змогу класифікувати групове використання АНПА за кількістю інформації, якою володіють та якою можуть обмінюватись АНПА групи [27]. Так, на цей час розрізняють наступні три способи групового використання АНПА за обсягами інформації для кожного «агента»:

- рій (по аналогії з популяціями комах) – кожний «агент» розв'язує свою індивідуальну задачу місії (наприклад, гідроакустичний пошук чи відеозйомка донної поверхні по маршруту руху; кожний окремий «агент» має навігаційні засоби для безпечного руху у складі рою, проте, не має інформації про загальне завдання місії, про склад рою та про положення і ролі інших «агентів»;

- зграя (по аналогії з пташиними зграями та косяками риби) – кожний окремий «агент» має мінімальний інформаційний зв'язок з іншими АНПА, необхідний для виконання місії (наприклад, для коригування поточної операції підводної місії); одночасно кожний окремий «агент» має навігаційні засоби для безпечного руху у зграї, хоча може не мати інформації про її загальний склад та характеристики; рух окремого «агента» підпорядковується руху її АНПА-лідера;

- колектив (по аналогії з колективами людей) – кожний окремий «агент» виконує індивідуальну задачу, яка може бути змінена під час місії; окремий «агент» має можливість інформаційного обміну з іншими АНПА як членами групи, має інформацію про мету підводної місії та окремі її складові, а також про характеристики АНПА – членів колективу.

Напрямки реалізації автоматичного керування груповим застосуванням АНПА за рівнями їх інформаційної обізнаності та інтенсивністю інформаційного обміну між АНПА як об'єктів автоматизації наведена на рис. 1.4.

Попередній аналіз публікацій дає змогу встановити, що прикладну наукову проблему P_{Gr} автоматизації процесів групового використання АНПА доцільно представити у вигляді чотирьох відносно незалежних задач:

- формулювання мети (кінцевого продукту) підводної місії P_{Gr-M} , яку необхідно виконати групі АНПА в автоматичному режимі шляхом одночасного виконання низки підводних робіт;

- розробка програми автоматичного виконання підводної місії P_{Gr-P} групою АНПА (стратегії керування), коли кожний АНПА як «агент» групи виконує свою частину спільної роботи;

- автоматичне керування паралельними процесами виконання розробленої програми автоматичного виконання підводної місії A_{Gr-M} групою АНПА;

- автоматичне керування окремим АНПА $A_{АНПА-M}$ як «агентом» групи, який автоматично виконує визначену йому частину розробленої програми підводної місії.



Рисунок 1.4 – Напрямки реалізації методів групового використання АНПА

Задачі наукової проблеми P_{Gr} можна представити у вигляді множини:

$$P_{Gr} = \{P_{Gr-M}; P_{Gr-P}; A_{Gr-M}; A_{АНПА-M}\}. \quad (1.3)$$

Запропонована декомпозиція задач керування (1.3), очевидно, має визначати й ієрархічну структуру системи керування підводною місією у цілому.

Перші дві задачі, зазвичай, передбачають розробку детального алгоритму (послідовності підводних робіт) функціонування групи АНПА і виконуються без урахування динаміки АНПА.

Так, розв'язок задачі P_{Gr-M} полягає у формулюванні кількісних показників реалізації одного або декількох методів, наведених на рис. 1.2.

Наприклад, для пошукових місій це можуть бути географічні координати донної акваторії, яку треба обстежити для пошуку затонулого об'єкта з

заданими класифікаційними ознаками. Для реалізації підводних наукових досліджень це можуть бути просторові координати водної товщі, яку необхідно відсканувати бортовими сенсорами АНПА гідрофізичних та/чи гідрохімічних параметрів води.

Розв'язок задачі P_{Gr-II} полягає у розробці траєкторій плоского чи просторового узгодженого у часі руху для кожного з АНПА групи. Такі переміщення мають відповідати заданій підводній місії (рис. 1.2) і гарантувати досягнення мети місії в умовах технічних обмежень окремих типів підводних апаратів щодо автономності та радіусу дії засобів зв'язку між ними.

Задача A_{Gr-M} автоматичного керування паралельними процесами виконання розробленої програми підводної місії полягає в розробці законів керування окремими АНПА як «агентами» групи, які мають переміщатись у водному просторі у відповідності до програми P_{Gr-II} . Тут важливою складовою задачі керування є забезпечення заданої програмою P_{Gr-II} просторової конфігурації групи АНПА, що має гарантувати якісне і своєчасне виконання підводної місії.

Задача $A_{АНПА-M}$ автоматичного керування окремими АНПА як «агентами» групи має одночасно забезпечувати:

- керування плоским чи просторовим рухом цих АНПА за програмою в умовах дії зовнішніх збурень та з урахуванням ресурсів окремих АНПА групи (маневрових якостей, радіусу дії їх засобів зв'язку тощо); ключовою вимогою тут є підзадача «збереження» групи на протязі усієї місії, тобто, недопущення віддалення сусідніх АНПА на відстань, яка перевищує радіус дії засобів зв'язку; також важливою вимогою є недопущення небезпечного зближення сусідніх АНПА з-за їх можливого зіткнення;

- керування корисним вантажем АНПА (зазвичай, це бортові сенсори – давачі гідрофізичних і гідрохімічних параметрів води, пошукові відеокамери та гідроакустичні сонари тощо); сутність керування полягає в забезпеченні його функціонування згідно з програмою виконання підводної місії P_{Gr-II} .

1.3 Способи організації керування групою пошукових АНПА

АНПА групи повинні організувати себе для виконання конкретних завдань у складних операціях. При цьому мають бути враховані архітектура АНПА, розподіл завдань між ними, стратегія керування P_{Gr-P} , локалізація завдань керування A_{Gr-M} , організація їх групового узгодженого руху $A_{АНПА-M}$. Ефективність застосування груп АНПА залежить від обраного методу керування. У результаті аналізу типових підводних робіт і методів (технологій) їхньої реалізації за допомогою групи АНПА [31], автор пропонує класифікацію методів групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами [32. 33].

Залежно від організації мультиагентної системи, методи групового керування АНПА діляться на два основних керування – централізоване й децентралізоване керування (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Способи організації керування групою АНПА

Доцільно виділити також допоміжне керування – напівдецентралізоване.

Наразі питання керування груповим рухом АНПА знаходяться у стані розробки й апробації різних теоретичних підходів [28-30].

Розглянемо вказані способи організації групового керування АНПА більш детально.

Централізоване керування полягає в наявності в групі ведучого АНПА (центральний пристрій керування – ЦПК), що управляє всіма АНПА в групі. Всі рішення приймаються провідним АНПА або головним ведучим комп'ютером, розташованим на борту провідного АНПА й передаються виконавчим контролерам окремих АНПА групи. Цей комп'ютер збирає інформацію про стан всіх АНПА як об'єктів керування, обробляє їх, і кожний об'єкт керування видає свою власну команду керування. Розрізняють єдиноначальне й ієрархічне централізоване керування групою АНПА.

При централізованому єдиноначальному керуванні є ведучий АНПА і множина ведених апаратів у групі. Всі АНПА синхронізуються ведучим, всі АНПА використовують той самий центральний контролер, що функціонує на основі інформації про всіх АНПА групи. Ведучий АНПА забезпечує оптимальне рішення спільного завдання, однак його відмова приводить до збою в роботі всієї групи.

При централізованому ієрархічному керуванні існує ієрархічне дерево керуючих пристроїв [34, 35]. Центр керування також прямо пов'язаний з кожним АНПА групи. Є субведучі, які контролюють ведені АНПА у своїх підгрупах, які також контролюються головним ведучим АНПА.

Ведучі АНПА оснащені високоточними навігаційними системами для підтримки ведених АНПА групи, і кожний ведений АНПА обмінюється інформацією з провідним АНПА. ЦПП контролює всю групу АНПА й, відповідно, планує дії окремих підгруп.

Згенеровані керуючі дії, які запропоновані для кожного АНПА, передаються йому для виконання. Для більших груп використовується ієрархічне керування.

Відмова головного ведучого АНПА приводить до збою в роботі всієї групи. При збої ведучого АНПА в підгрупі схема призначення ролі використовується для ідентифікації нового ведучого АНПА серед АНПА підгрупи. Ця схема об'єднує у собі такі методи, як підхід "ведучий - ведений" і аналіз дерева відмов з нечіткими трикутниками [36].

Децентралізоване керування передбачає розподіл функцій керування між окремими незалежними АНПА групи. Кожний АНПА керується своїм власним контролером, вибираючи дію (паралельно), ґрунтуючись винятково на локально спостережуваній інформації, найближчому середовищі й спостереженні, отриманому найближчими сусідами АНПА в цей момент часу.

Децентралізоване керування є ефективним при збільшенні кількості АНПА в групі. Відсутність зв'язку між АНПА обмежує досяжну продуктивність, і якщо один з АНПА втрачає зв'язок з командним центром, його неможливо використовувати в групі.

Розрізняють два різних підходи до координації й організації групи АНПА – керування «поводженням» і «керування «ведучим-веденим» [34, 35].

Керування «поводженням» групи засновано на інтелектуальному поводженні АНПА в групі при виконанні складних підводних місій (пошукових, обстежувальних, вимірювальних і т.д.). Кожна група АНПА функціонує незалежно від інших груп АНПА, маючи можливість обмінюватися з ними оперативними даними.

Перевага такого керування – групова динаміка містить зворотний зв'язок, що дозволяє максимально автоматизувати процес виконання складної місії. Недоліком є те, що поводження групи непередбачуване.

У підході керування «ведучим-веденим» АНПА діляться на дві категорії по здатності АНПА: провідні (ведучі) й ведені.

Також існує комбіноване (змішане) керування відповідно до ієрархічного принципу, коли є велика кількість груп, і АНПА групи також діляться на більш дрібні групи [37].

По можливості узгодження індивідуальних прийнятих рішень, стратегії децентралізованого керування діляться на колективні, зграйні, ройові й комбіновані стратегії керування [38].

У методі колективного керування групою АНПА кожна група АНПА одержує інформацію від всіх АНПА й передає зібрану інформацію про навколишнє середовище й свій власний стан у канал зв'язку для забезпечення доступу всім іншим АНПА групи й оптимізує колективні дії групи. Кожна група АНПА самостійно визначає свої необхідні дії [39].

Вибір дій групою АНПА здійснюється тільки на основі інформації про мету групи, поточну ситуацію в середовищі і діях інших груп АНПА для досягнення загальної мети. Стратегії колективного контролю дозволяють групі залишатися працездатною у випадку відмови одного або декількох АНПА групи.

При зграйному керуванні виділений канал зв'язку для обміну інформацією між АНПА відсутній. Кожний АНПА самостійно збирає інформацію про середовище та приймає рішення щодо своїх наступних дій для виконання групового завдання [38].

Всі АНПА виконують однаковий алгоритм, і їхні дії незалежні й асинхронні. Кожний АНПА може виконувати більше однієї операції та може міняти одну на іншу. Перевага такого керування – масштабованість: при збільшенні кількості АНПА групи обчислювальна складність завдань керування не зростає.

Ройове керування засноване на ідеї ройового інтелекту [39], як і в природному світі (бджолині колонії, колонії мурах і т.д.) і управляє колективною поведінкою однотипних портативних і дешевих АНПА з достатньою маневреністю й зв'язком. Окремий «агент» має невеликий радіус дії системи зв'язку тільки зі своїми найближчими АНПА й не вимагає якої-небудь центральної координації.

Кожний АНПА приймає свої власні рішення щодо поточного поведіння, ґрунтуючись на даних про навколишнє середовище й від сусідніх

АНПА, які видаються у формі місцевих правил. Перевага такого керування – більш оптимальне рішення проблеми обміну інформацією в групах АНПА для досягнення колективних цілей [40]. Можливі два сценарії по характеру обміну інформацією:

- коли АНПА виявляє ціль пошуку, він інформує сусідні АНПА, які передають цю інформацію своїм сусідам; у результаті інформація стає відома всім АНПА групи; потім вони змінюють траєкторію руху до цілі;

- коли АНПА виявляє ціль, але не може повідомити свої координати іншим АНПА; він змінює траєкторію руху до цілі; інші АНПА, з дотриманням правил найближчих сусідів, будуть рухатись за ним, і він стане ведучим АНПА.

Нижче представлений перелік деяких алгоритмів ройового інтелекту, назви яких добре відбивають суть підходу до рішення завдань [16, 41, 42]:

- мурашиний алгоритм (Ant colony optimization, ACO);
- бджолиний алгоритм (Bees algorithm – BEECLUST);
- метод рою часток (Particle Swarm Optimization, PSO);
- оптимізація пересуванням бактерій (Bacterial Foraging Optimization, BFO);
- стохастичний дифузійний пошук (Stochastic Diffusion Search);
- алгоритм гравітаційного пошуку (Gravitational search algorithm);
- алгоритм крапель води (Intelligent Water Drops algorithm);
- світлячковий алгоритм (Firefly Algorithm, FA).

У напівдецентралізованому керуванні існує локальний зв'язок між АНПА. Цей вид групового керування здійснюється від централізованої стратегії до децентралізованих стратегій [34] із проміжними діями і, в той же час, працює на «користь» всієї групи АНПА в цілому, де присутні елементи як централізованого, так і децентралізованого керування.

У цьому методі керування є ведучий підводний апарат, що розподіляє завдання для інших АНПА групи. При цьому, кожний АНПА досягає своєї підводної цілі, приймаючи свої власні рішення, які генеруються його системою автоматичного керування.

1.4 Аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА

Прикладній науковій проблемі автоматичного керування групою АНПА присвячено значну кількість досліджень [17, 43-47].

Так, у роботі [17] детально розглянуто питання децентралізованого рівномірного розосередження групи АНПА та динамічного планування їх місій. Розглянуто також питання сталого функціонування групи АНПА під час їх підводного руху.

В роботі [43] розглянуто проблему організації спільних узгоджених дій колективу АНПА та запропоновано узагальнений підхід до її вирішення. В основу розв'язку покладено ідею самоорганізації колективу АНПА, яка спирається на принцип ієрархії ("вкладеності") процесів управління та прийняття рішень, та на принцип функціональної декомпозиції (розбиття задачі на підзадачі). Автори пропонують набір базових службових алгоритмів колективної поведінки АНПА, який складається з двох частин: «управлінської» (А1) та «функціональної» (А2):

- А1-1: самовиявлення колективу АНПА;
- А1-2: самоіменування колективу АНПА;
- А1-3: самоузгодження колективу АНПА;
- А2-1: самоорганізація колективу АНПА у просторі;
- А2-2: самоорганізація колективу АНПА у часі;
- А2-3: самоорганізація колективу АНПА за параметром.

Запропонований авторами підхід дає два шляхи вирішення проблеми організації узгоджених колективних дій АНПА:

- на інфраструктурному рівні – розроблення службових алгоритмів колективної поведінки;

- на прикладному рівні – розроблення складних процедур колективної поведінки з використанням службових алгоритмів як "готових" складових елементів.

Однак, у вказаній роботі питання автоматичного керування безпечним рухом групи АНПА не розглядаються.

У роботі [44] сформульовано перелік типових задач керування АНПА у режимах одиночного та групового застосування при плаванні в складних навігаційних умовах. До головних задач керування автори відносять:

- формування достовірної інформації про гідрофізичні та гідрохімічні характеристики підводного середовища, у якому функціонує АНПА;
- розробку високоефективних САК траєкторним рухом одиночного АНПА в умовах активної дії зовнішніх збурень;
- розробку систем автоматичного обходу статичних та динамічних навігаційних перешкод;
- розробка концепції адаптивної зміни місій одиночного АНПА в залежності від поточної підводної обстановки.

До задач навігаційного забезпечення одиночного АНПА віднесено:

- розробку системи автоматичного виявлення і розпізнавання підводних об'єктів;
- розробку системи ідентифікації та класифікації підводних цілей (одиночних і групових).

При груповому застосуванні АНПА вказаний перелік підводних задач автори доповнюють:

- задачами інформаційного обміну між апаратами групи, який включає передачу даних про власне місцезнаходження окремого АНПА та його технічний стан за результатами самодіагностики, трансляцію даних про місцезнаходження та технічний стан інших апаратів групи (при послідовній схемі зв'язку у групі), передачу даних про виявлені цілі та їхні характеристики);
- задачами розробки алгоритмів групового керування АНПА у наступних режимах: режим групового пошуку цілей на заданій акваторії, режим обстеження виявленої цілі групою АНПА, режим одночасного обстеження

декількох виявлених цілей, режим ухилення від підводних об'єктів, які загрозово маневрують;

- задачами самоідентифікації АНПА як члена групи та групи АНПА у цілому як керованої множини носіїв пошукового обладнання.

У роботі [44] також розроблено узагальнену архітектуру САК апаратом у цих умовах, яка передбачає наступні п'ять рівнів функціонування САК АНПА:

- рівень формування моделі зовнішнього середовища, у якому функціонує одиночний АНПА чи група апаратів;

- рівень самодіагностики АНПА як одиночно функціонуючого підводного робота і як члена групи підводних апаратів, які виконують спільну місію;

- рівень планування місії, де на основі завдань від бібліотеки місій формуються вихідні дані керування просторовим рухом АНПА та визначаються завдання на коригування його траєкторного руху під впливом дії зовнішнього середовища та поточних завдань для групи АНПА;

- рівень керування процесом виконання підводної місії – забезпечення просторового руху з заданими параметрами та виконання пошукових функцій одиночним АНПА та АНПА як члена групи апаратів;

- рівень виконання, де генеруються програми автоматичного керування виконавчими механізмами та системами – рушійно-стерновим комплексом АНПА та його пошуково-ідентифікаційним комплексом, а також програми комунікацій окремого АНПА з лідером групи апаратів.

Однак, автори роботи [44] не розглядають питання розробки базових алгоритмів керування АНПА при виконанні поставлених задач.

У роботі [45] викладено результати синтезу багаторівневої САК групового керування АНПА, яка містить наступні рівні:

- рівень мегакерування, на якому розробляється загальний план організації пошукових підводних робіт за безлюдними технологіями, формується склад груп пошукових АНПА та ін.;

- рівень стратегічного керування групою АНПА, який реалізується АНПА-лідером і включає розробку стратегічної поведінки групи АНПА;

- рівень тактичного керування i -ю групою АНПА, на якому планується фактичне виконання пошукової місії та розробляється завдання для кожного АНПА i -ї групи;

- рівень локального керування окремим АНПА у такій системі – на основі обробки власної навігаційної інформації та поточних технічних характеристик апарата, інформації від пошукових сенсорів та від власної системи зв'язку;

- рівень контролю якості групового керування АНПА, який виконує функції зворотного зв'язку між окремими АНПА та відповідними рівнями багаторівневої САК групою АНПА.

Однак, в роботі [45] не розглядаються питання синтезу, власне, САК АНПА, які мають забезпечувати реалізацію вказаних рівнів функціонування.

Розглянемо тепер сучасний стан досліджень у напрямку автоматичного керування групою АНПА, виходячи з тих задач множин (1.1) та (1.2), які прийняті для дослідження у дисертаційній роботі.

Задача L_{Ag} забезпечення навігаційної безпеки просторового руху АНПА у складі групи. Питанням навігаційної безпеки присвячено низку робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів [46-50].

У роботі [46] запропоновано метод навігації в групі автономних самохідних «агентів», який за допомогою супутникових навігаційних систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo та IRNSS забезпечує глобальну, локальну та внутрішню навігацію. Однак, застосування запропонованого методу для підводної навігації неможливе з-за непрацездатності вказаних супутникових систем у водному середовищі.

Робота [47] присвячена застосуванню штучних нейронних мереж для побудови високоточної та оптимальної за швидкістю САК АНПА. У результаті авторами отримано САК, яка забезпечує зміну швидкості руху підводного апарата з будь-якої початкової до заданої за мінімальний проміжок часу. Однак, питання навігаційної безпеки у роботі не розглядаються.

У роботі [48] запропоновано структуру САК АНПА, яка має дублювання апаратної частини та резервне копіювання програмного забезпечення, що

підвищує надійність її функціонування. Крім того у роботі розроблено метод керування виконавчими двигунами АНПА на основі нечіткої логіки. Це дає змогу суттєво підвищити експлуатаційні характеристики АНПА при виконанні складних підводних місій.

Запронована САК є перспективною для реалізації високоякісних підводних технологій, проте, потребує суттєвого доопрацювання для застосування в задачах групового керування АНПА.

Перспективним є технічне рішення щодо керування мікро-АНПА «AR2D2», яке побудоване із застосуванням системи штучного зору [49]. САК таким АНПА дає змогу виявляти підводні об'єкти, позначені кольором і, далі, виконувати функції стеження за ними. Разом з цим, запронована САК мікро-АНПА не передбачає його використання в групі, оскільки не містить підсистеми навігаційної безпеки.

Найближче до розв'язку задачі L_{Ag} підійшли автори роботи [50], які розв'язують питання синтезу системи групового керування АНПА шляхом визначення АНПА-лідера групи.

Такий підводний апарат відстежує задану траєкторію руху, а інші АНПА групи забезпечують просторову конфігурацію руху без зіткнень. Сигнал керування для кожного АНПА розраховується виходячи з відносного положення сусідніх апаратів та власної швидкості, яка отримується за допомогою бортових датчиків без системи зв'язку між АНПА. Однак, робота не містить відомостей про технічну реалізацію САК і має пошуковий характер.

Задача B_{Gr} розробки базових алгоритмів роботи АНПА в групі. Заслугує на увагу робота [51], у якій всебічно аналізуються узагальнені методи управління групою АНПА: метод віртуальної структури, метод на основі поведінки, метод «лідер-послідовник» та метод штучного потенціалу поля. Також у роботі проаналізовано особливості та труднощі управління групою АНПА, особливо для багатоагентної системи.

Крім того, виконано аналіз критичних технічних проблем, які узагальнені як три напрямки: проблема динамічної складності АНПА; проблема екологічної

складності застосування групи АНПА; проблема серйозних обмежень, пов'язаних з реалізацією надійного підводного зв'язку між АНПА-«агентами» групи.

Однак, розв'язки конкретних задач керування групою АНПА у роботі не наводяться.

Задача L_{Gr} розробки алгоритмів керування окремими видами морських пошукових операцій. Оскільки пошукові операції є одним з головних завдань для групового застосування АНПА, їх алгоритмізації присвячено значну кількість зарубіжних публікацій [52-56].

Дослідження [52] присвячене аналізу стратегій поведінки групи АНПА при виборі оптимальних маршрутів під час руху у неповністю визначеному середовищі з урахуванням обмежень на енергоресурси АНПА та необхідність інформаційного обміну між ними. Для розподілу цілей між АНПА автори використовують генетичний алгоритм, який обирає порядок обходу цілей згідно заданій цільовій функції.

Результати роботи можуть бути покладені в основу планування пошукових місій групи АНПА як один з варіантів побудови базових алгоритмів групового керування, однак вимагають додаткових досліджень для застосування у морській практиці.

У роботі [53] досліджуються переваги побудови інтегрованих систем керування АНПА та реалізації на їх основі мультиагентної технології групового керування АНПА. Показано, що до переваг інтеграції керування АНПА відносяться:

- підвищення ефективності керування з-за можливостей оптимізації алгоритмів функціонування всіх елементів системи;

- зменшення масогабаритів та енергоспоживання електронної апаратури з-за використання єдиного обчислювального модуля та єдиної системи енергоживлення;

- можливість застосування принципів уніфікації програмно-технічних рішень САК для різних типів АНПА.

У роботі наведено послідовність етапів виконання типових пошукових місій та обговорюються питання декомпозиції складних агентів мультиагентної системи на менш складні агенти підсистем. Цінним є розподіл агентів на:

- агентів для комунікацій та планування поточних підводних місій;
- агентів для адаптивної оптимізації роботи групи АНПА в активному і пасивному режимах;
- агентів для управління, відповідно, активними і пасивними режимами роботи АНПА.

Це дає можливість якісно організувати завдання по висвітленню підводної обстановки у робочій зоні, вирішувати питання навігації та гідроакустичного зв'язку між АНПА, керування технічними засобами окремих АНПА. Однак, відомостей, достатніх для практичної реалізації мультиагентних технологій, у роботі не наведено, що обумовлює необхідність додаткових прикладних досліджень для створення теоретичних основ побудови САК групою АНПА.

У роботі [54] розглядаються принципи побудови розподіленої мультиагентної системи для керування угрупованням роєм АНПА для розподіленого виконання завдання патрулювання заданої акваторії. Автори пропонують нову методичну основу для розробки розподілених інтелектуальних систем колективного керування рухомими робототехнічними об'єктами нового покоління, що дозволить вирішувати важливі завдання погодженої діяльності групи АНПА і забезпечить такі важливі переваги як гнучкість і ефективність, продуктивність і масштабованість, надійність і живучість системи.

Автономність АНПА забезпечується наявністю індивідуальної інтелектуальної системи керування (ІСК) кожним апаратом, здатної реагувати на події, планувати свою роботу з досягнення мети й обмінюватись інформацією із іншими апаратами.

Програмні складові підводної місії системи, яка розроблюється, покликані вирішувати локальні завдання:

- забезпечення спостереження за певним квадратом акваторії;
- вибір безпечного маршруту руху;
- підтримка необхідного запасу заряду батарей;
- забезпечення сеансів зв'язку з базою;
- ідентифікація певних цілей із заданого переліку (завдань для кожного АНПА).

Пропонований метод адаптивного планування базується на введенні функцій задоволеності кожного агента системи, які описують відхилення атрибутів параметрів від бажаних ідеальних значень.

Загальний принцип побудови розподіленої системи керування угрупованням АНПА вимагає застосування мережецентричного підходу в створенні багатоагентної "системи систем", узгоджено взаємодіючих на базі *p2p*-принципів (варіант архітектури системи, в основі якої стоїть мережа рівноправних вузлів) між собою через загальну шину.

При цьому з'являється можливість створити систему, яка самоорганізується, та у якій директивний командний центр по прийняттю рішень, зберігаючи при цьому всі можливості для постановки завдань, координації й оцінки результатів, не керує процесами, а використовує пряму взаємодію «агентів» між собою для узгодження рішень. Це дозволяє отримати САК групою АНПА нового типу – «командного інтелекту».

Отримані авторами результати є перспективним напрямком розвитку «ройових» методів групового керування, однак, вимагають проведення додаткових прикладних наукових досліджень для застосування у морській практиці.

Досить обтяжні та важливі для теорії і практики наукові результати були отримані під час виконання європейського проекту "GREX", який спільно виконувався університетами та робототехнічними фірмами Великобританії, Франції, Німеччини, Португалії та інших країн Євросоюзу на протязі 2006-2009 рр. [55].

Проект передбачав морські натурні випробування з метою перевірки концепції групового використання двох АНПА та двох катамаранів (безкіпажних надводних судна, БНС), які мали внутрішньомобільний зв'язок для виконання низки автономних підводних місій, для яких необхідно було планувати та виконувати маневри та кооперативні дії (рис. 1.6).

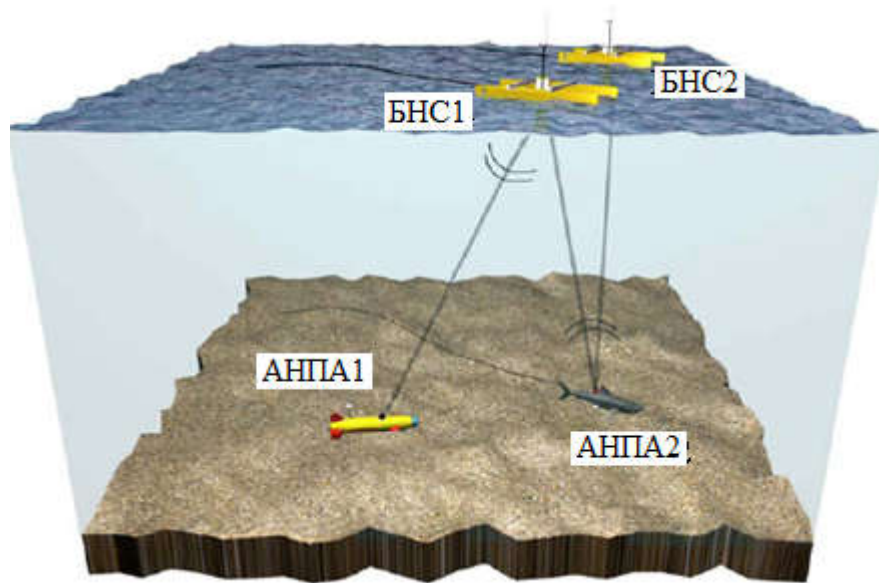


Рисунок 1.6 – Робототехнічні складові проекту Євросоюзу “GREX”

Отримані єврокомандою науковців результати підтвердили працездатність концепції групового використання АНПА та надводних безкіпажних суден для виконання спільних морських місій в невизначених умовах експлуатації [55, 56]. Однак, конкретні науково-технічні рішення, які можна було б використати для практичної побудови аналогічних морських систем, автори не наводять.

1.5 Актуальні задачі автоматизації пошукових підводних операцій і постановка задачі дослідження

Аналіз стану проблеми застосування засобів морської робототехніки для виконання пошукових підводних операцій свідчить, що використання групових

технологій застосування АНПА знаходиться на початковій стадії і належить до магістральних напрямків розвитку морських технологій.

Розглянемо узагальнені показники групового застосування АНПА у пошукових операціях, виходячи зі SWOT-аналізу [57].

До головних переваг групового застосування АНПА слід віднести:

- високу продуктивність підводних пошукових робіт, оскільки вони виконуються на великих за площею акваторіях із залученням групи АНПА, причому, кількість підводних апаратів у групі може змінюватись у залежності від вимог до загальної тривалості пошукової операції [58];

- низькі фінансові витрати на проведення морських операцій, оскільки для їх проведення застосовують дешеві АНПА, собівартість створення яких на 2-3 порядки нижча за собівартість традиційних АНПА малого класу [59].

До основних недоліків групового застосування АНПА, які стримують їх широке застосування, слід віднести:

- складність автоматизації узгодженої роботи групи АНПА при виконанні спільної пошукової місії;

- складність розробки САК безаварійним груповим рухом АНПА в умовах дії зовнішніх збурень природного та/або антропогенного походження;

- складність організації системи комунікацій між «агентами» групи АНПА та відсутність «on-line»-зв'язку між групою АНПА та береговим центром керування пошуковою операцією;

- існування ризиків втрати частини підводних апаратів групи внаслідок дії зовнішніх факторів, збоїв програмного забезпечення САК чи технічних відмов окремих АНПА.

Таким чином, більшість проблемних питань, розв'язок яких відкриває можливість промислового використання групових технологій використання АНПА, пов'язані з розробкою високоефективних систем автоматичного керування групою АНПА та окремими АНПА як «агентами» групи.

Тому у дисертаційній роботі як найбільш актуальні для поточного стану вітчизняної науки розглядаються розв'язки наступних головних задач автоматизації групового застосування АНПА:

- 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.

Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу сучасного стану у галузі підводної робототехніки показано, що одним з активно розроблюваних її напрямків є групове застосування АНПА. У світовій практиці цей прикладний напрямок робототехніки отримав назву «Collective Cognitive Robots» (CoCoRo, колективні когнітивні апарати-роботи) і сьогодні знаходиться на початковій стадії розробки.

2. Виконано аналіз сучасних методів групового застосування АНПА для проведення пошукових підводних робіт, наукових та природоохоронних досліджень, обстежувальних, інспекційних та воєнних підводних робіт. Показано, що концептуально у розвитку методів групового використання АНПА спостерігається розвиток двох напрямків автоматизації – розвиток індивідуальних характеристик АНПА як «агента» групи та розвиток методів керування груповим застосуванням АНПА.

3. 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.

4. На основі аналізу сучасних підходів до групового керування АНПА встановлено три основні способи їх використання – ройовий, зграйний та колективний. Показано, що спільну наукову проблему автоматизації процесів групового використання АНПА можна представити у вигляді чотирьох відносно незалежних задач: формулювання мети (кінцевого продукту) підводної місії, яку необхідно виконати групі АНПА шляхом одночасного виконання низки підводних робіт; розробка програми автоматичного виконання підводної місії групою АНПА (стратегії керування); керування паралельними процесами виконання розробленої програми виконання підводної місії; автоматичне керування окремим АНПА як «агентом» групи.

5. Виконано аналіз способів організації керування групою пошукових АНПА, у результаті чого виділено два основні способи – централізоване і децентралізоване керування групою АНПА, а також додатковий спосіб – напівдецентралізоване керування, який поєднує деякі властивості двох попередніх основних способів керування групою..

6. Методом вивчення літературних джерел виконано аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА. Сформульовано переліки типових задач керування АНПА у режимах одиночного та групового застосування при плаванні в складних навігаційних умовах, задач навігаційного забезпечення одиночного АНПА та задач групового застосування АНПА.

7. Як результат аналізу сучасного стану в області автоматизації процесів групового застосування АНПА (автоматизації Co-Co-Ro – технологій) сформульовано головні задачі дисертаційного дослідження:

- 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.

Основні матеріали розділу 1 опубліковано в [32, 33, 42].

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

2.1 Попередні зауваження

Виходячи з п.р. 1.5 можна констатувати, що для успішного розв'язання сформульованих задач дисертаційного дослідження, в першу чергу, необхідно виконати синтез системи автоматичного керування рухом одиночного АНПА в умовах навігаційної близькості інших АНПА його групи. Це забезпечить безпечний рух кожного окремого АНПА групи в усіх режимах її функціонування при виконання підводної місії.

Другою задачею дисертаційного дослідження є розробка аналітичних залежностей, які описують організацію групового руху АНПА, що має утворити теоретичну основу побудови систем автоматичного керування їх груповим рухом при виконанні пошукових місій.

Нарешті, третьою задачею дисертаційного дослідження є розробка та обґрунтування керованого процесу планування та виконання морської пошукової операції з використанням групи АНПА, що має підвищити продуктивність пошукових підводних робіт при їх проведенні на віддалених акваторіях.

Перевірку ефективності розв'язку вказаних теоретичних задач доцільно виконувати шляхом морського натурного експерименту, залучивши один (для першої задачі) та декілька (для другої задачі) підводних апаратів, встановивши на них синтезовані САК відповідного призначення.

Однак, організація і проведення морських натурних експериментів на цей час є складною операцією з технічної точки зору і високовартісною з позицій її фінансування.

Зазвичай, для таких перевірок дослідники морської робототехніки широко застосовують метод комп'ютерного експерименту, тобто досліджень математичної моделі об'єкту за допомогою ЕОМ [60, 61].

Сутність комп'ютерного експерименту полягає в тому, що ефективність розроблених САК перевіряється шляхом цифрового моделювання процесів керованої динаміки АНПА з використанням математичних моделей, які описують взаємодію підводного апарата з навколишнім водним середовищем.

При цьому, в ЕОМ програмно реалізуються й синтезовані регулятори та САК АНПА у цілому, що суттєво скорочує процеси перевірки ефективності їх функціонування.

Даний вид експерименту можна лише умовно віднести до експерименту, оскільки він не відображає природні явища, а лише є чисельною реалізацією створеної дослідником математичної моделі об'єкту дослідження. Тому нижче у роботі наводяться математичні моделі АНПА та їх елементів, достовірність яких перевірена та підтверджена тривалим успішним застосуванням як у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, так і зарубіжними ученими.

Разом з тим відомо, що метод комп'ютерного експерименту надає результати з деяким наближенням, оскільки покладені в його основу математичні моделі об'єкту керування не повністю враховують всі його особливості, які мають місце при реальній експлуатації [62]. Тому в дисертації для одного з найбільш складних режимів роботи синтезованих САК передбачено проведення морського натурного експерименту.

Розглянемо особливості організації й застосування вказаних методів.

2.2 Основні складові математичної моделі одиночного АНПА групи

Математичне моделювання є ефективним інструментом для дослідження АНПА, оскільки натурні експерименти з такими складними об'єктами вимагають великих матеріальних ресурсів, значних фінансових та організаційних витрат [63, 64].

Зазвичай, математичне моделювання керованого руху АНПА представляють сукупністю наступних інформаційних, електромеханічних та

гідромеханічних систем як складових математичної моделі об'єкту керування, що взаємодіють між собою:

- інформаційна система (ІС) АНПА – сенсори просторового стану АНПА та його динамічних характеристик I_{IC} (кутів, кутових швидкостей та прискорень, лінійних переміщень, швидкостей руху та прискорень тощо); далі роботу вказаних сенсорів вважаємо ідеальною, що дає змогу нехтувати їх помилками вимірювань; крім того, для АНПА як «агента» групи характерними є сигнали сенсорів про небезпечне наближення АНПА-сусідів по групі (загроза зіткнення) та неприпустиме збільшення дистанції до них (загроза втрати зв'язку між апаратами та «розпорошення» групи АНПА;

- система автоматичного керування рухом АНПА (САК, виконавчий рівень) – функціональна структура та програмне середовище, призначене для обробки інформації від сенсорів та для генерування керуючих сигналів для виконавчих механізмів АНПА (у першу чергу – рушійно-стернового комплексу); конкретна модель САК визначається у результаті синтезу окремих регуляторів та розробленої чи прийнятої узагальненої структури САК;

- рушійно-стерновий комплекс АНПА (РСК) – це один автономно працюючий кормовий рушій (гребний гвинт контрроторного обертання), за ним розміщені поворотні стерна для керування кутовими рухами апарата навколо вертикальної та поперечної осей; гребний гвинт (ГГ) отримує механічну енергію від відповідного гребного електричного двигуна (ГЕД) через валопровід; з позицій математичного моделювання для таких комплексів необхідно враховувати нелінійні залежності упорів ГГ від їх кутової частоти обертання [65];

- зовнішній корпус АНПА (ЗК) – це тверде тіло, що рухається у воді під дією РСК і сприймає сили гідродинамічного опору з урахуванням приєднаних мас води у динамічних режимах; на корпус АНПА діють також сили зовнішніх збурень;

- сили зовнішніх збурень F_{33} , які діють на зовнішній корпус АНПА (ЗК) – хвильова і вітрова дія (при поверхневому русі АНПА), течія;

При розробці математичних моделей елементів АНПА у дисертаційній роботі прийняті наступні загальні припущення, які не викривляють фізики явищ, що протікають в об'єкті дослідження:

- робоче середовище (вода) розглядається як ідеальна незбурена рідина;
- вектор упору рушії та сили зовнішніх збурень прикладаються до центру мас АНПА і не створюють диферентів і кренів;
- АНПА у воді має нульову плавучість.

2.3 Математичне моделювання динаміки одиночного АНПА як об'єкта керування

2.3.1. Загальний підхід до побудови математичної моделі. У якості базової математичної моделі одиночного АНПА групи у дисертації використано залежності з [64], де зовнішній корпус АНПА розглядається як тверде тіло, що рухається в ідеальній незбуреній рідині. Це дає змогу не враховувати силову взаємодію між його елементами, які мають масу. Для дослідження керованого руху ЗК будемо використовувати земну базову (БСК) та рухому зв'язану з корпусом АНПА (ЗСК) системи координат, які широко застосовуються дослідниками морських рухомих об'єктів. Основні залежності між системи координат та кінематичні параметри АНПА наведено у Додатку Б.

2.3.2. Загальна форма рівнянь динаміки одиночного АНПА як твердого тіла у потоці води. Зазвичай рух окремого АНПА розглядається згідно законам механіки твердого тіла в тривимірному водному просторі з шістьма ступенями свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центра мас, інші три – обертання твердого тіла відносно центра мас. Кожному ступеню свободи відповідає одна швидкісна координата, у якості якої виступає проекція вектора лінійної або кутової швидкості на відповідну вісь обраної системи координат [64].

Основний закон динаміки АНПА у матричній формі має наступний вид [64]:

$$\frac{d_A V}{dt} = I^{-1}(T - KIV); \quad \frac{d_B R}{dt} = K_V(V + V_s),$$

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.

Елементи матриць основного закону динаміки утворюються наступним чином:

$$V = [\vec{v} \quad \vec{\omega}]^T = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T;$$

$$R = [\vec{r} \quad \vec{q}]^T = [x \quad y \quad z \quad \theta \quad \varphi \quad \psi]^T;$$

$$I = M + \Lambda;$$

$$M = \text{diag}\{m, m, m, J_x, J_y, J_z\}; \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{61} & \cdots & \lambda_{66} \end{bmatrix};$$

$$T = [\vec{F} \quad \vec{M}]^T = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T;$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_z & v_y & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_z & 0 & -v_x & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -v_y & v_x & 0 & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

$$K_V = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix};$$

$$K_v = \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \\ j_x & j_y & j_z \\ k_x & k_y & k_z \end{bmatrix}^T;$$

$$K_\omega = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1};$$

$$V_s = [\bar{v}_s \quad 0_{1 \times 3}]^T = [v_{sx} \quad v_{sy} \quad v_{sz} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T,$$

де: v_x, v_y, v_z – проєкції вектора поступальної швидкості АНПА по відношенню до води на осі ЗСК; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проєкції вектора обертової швидкості АНПА по відношенню до води на осі ЗСК; x, y, z – координати центру мас АНПА в БСК; θ, ϕ, ψ – кути крену, диференту та ристання АНПА (кути Ейлера); M – матриця власних мас та моментів інерції АНПА; Λ – матриця приєднаних мас води; m – власна маса АНПА; J_x, J_y, J_z – моменти інерції АНПА, розраховані по відповідних осях ЗСК; λ_{ij} – приєднані маси води, $i=1, 2, \dots, 6, j=1, 2, \dots, 6$; \vec{F} , \vec{M} – відповідно вектори рівнодіючих сил та моментів, які діють на АНПА; F_x, F_y, F_z – проєкції вектора рівнодіючої сили на осі ЗСК; M_x, M_y, M_z – проєкції вектора рівнодіючого моменту на осі ЗСК; K_v – матриця зв'язку між ЗСК та БСК; K_ω – матриця зв'язку обертового руху АНПА; $i_x, i_y, i_z, j_x, j_y, j_z, k_x, k_y, k_z$ – проєкції базисних векторів базису ЗСК на осі ЗСК; \bar{v}_s – вектор швидкості течії по відношенню до БСК; v_{sx}, v_{sy}, v_{sz} – проєкції вектора \bar{v}_s осі ЗСК; верхній індекс T позначає операцію транспонування матриці.

Матриця Λ симетрична, тобто $\lambda_{ij}=\lambda_{ji}$. Коефіцієнти λ_{ij} називають приєднаними масами, термін маса тут вживається в загальному розумінні, і коефіцієнти λ_{ij} характеризують інерційність взагалі.

Елементи матриці Λ залежать виключно від геометрії зовнішньої поверхні АНПА [6].

Основний закон динаміки АНПА в якості вхідних даних отримує матрицю рівнодіючих сил та моментів T , на виході отримуються кінематичні параметри АНПА: швидкісні у вигляді матриці V та позиційні у вигляді матриці R .

2.3.3. Гідродинамічні сили та моменти. Гідродинамічні (в'язкі) сили та моменти з'являються на корпусі АНПА внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем при його русі. Визначення цих сил є комплексним завданням гідромеханіки, для розв'язку якого застосовуються методи та засоби обчислювальної гідродинаміки та басейнових та морських натурних випробувань [1, 62]. Але при моделюванні АНПА користуються спрощеним представленням цих сил та моментів шляхом їх представлення у вигляді суми лінійної та квадратичної залежностей від швидкості руху АНПА по відношенню до водного середовища [63]:

$$T_h = \begin{bmatrix} \vec{F}_h & \vec{M}_h \end{bmatrix}^T = D(V)V,$$

де D – матриця параметрів опору, \vec{F}_h – вектор гідродинамічних сил опору, V – матриця швидкостей (поступальних та обертових) АНПА відносно води; \vec{M}_h – гідродинамічний момент опору,.

Гідродинамічні коефіцієнти, які містить матриця D , вважаються константними.

Для тіла, повністю зануреного у воду, приймаємо припущення [63]:

$$D(V) = -\left(\text{diag}\{a_l, b_l, c_l, p_l, q_l, r_l\} + \text{diag}\{a_q|v_x|, b_q|v_y|, c_q|v_z|, p_q|\omega_x|, q_q|\omega_y|, r_q|\omega_z|\} \right),$$

де $a_{l,q}$, $b_{l,q}$, $c_{l,q}$, $p_{l,q}$, $q_{l,q}$, $r_{l,q}$ – параметри гідродинамічного опору АНПА; $v_{x,y,z}$, $\omega_{x,y,z}$ – проєкції, відповідно, векторів поступальної та обертової швидкостей АНПА на осі ЗСК.

Елементи матриці D формуються на основі густини води, геометричних розмірів АНПА та гідродинамічних коефіцієнтів, які включають: $k_{F_{x,y,z}}$ – гідродинамічні коефіцієнти сил опору по відношенню до осей ЗСК, $k_{M_{x,y,z}}$ – гідродинамічні коефіцієнти моментів опору по відношенню до осей ЗСК

2.3.4. Сили та моменти тяжіння і плавучості. Сила тяжіння АНПА визначається на основі прискорення вільного падіння:

$$\vec{F}_g = mg\vec{e},$$

де m – маса АНПА (без приєднаних мас води), g – прискорення вільного падіння, \vec{e} – одиничний вектор, спрямований вертикально вниз.

Сила тяжіння не створює моментів, тому матриця сил та моментів тяжіння T_g матиме наступний вигляд:

$$T_g = \begin{bmatrix} \vec{F}_g & \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix}^T.$$

Сила плавучості визначається на основі густини води ρ та зануреного в неї об'єму АНПА Ω :

$$\vec{F}_b = -\rho\Omega g\vec{e}.$$

Точка прикладення сили плавучості зазвичай не співпадає з центром мас АНПА, через це сила плавучості створює момент:

$$\vec{M}_b = \vec{r}_b \times \vec{F}_b,$$

де \vec{r}_b – радіус-вектор, який з'єднує центр мас АНПА та точку прикладення сили плавучості.

Матриця сил та моментів плавучості T_b утворюється на основі елементів векторів \vec{F}_b та \vec{M}_b :

$$T_b = \begin{bmatrix} \vec{F}_b & \vec{M}_b \end{bmatrix}^T.$$

При проектуванні підводної техніки блок плавучості розташовують так, щоб координати прикладення сили плавучості x_b і z_b дорівнювали нулю. Це забезпечить пасивну стабілізацію крену та диференту АНПА.

Згідно принципу суперпозицій сума матриць T_g та T_b утворює матрицю T_{gb} , яка враховує вплив на АНПА сил та моментів тяжіння та плавучості:

$$T_{gb} = \begin{bmatrix} \vec{F}_g + \vec{F}_b & \vec{M}_b \end{bmatrix}^T.$$

Вектори \vec{F}_g , \vec{F}_b та \vec{M}_b задаються в проєкціях на осі ЗСК.

Підводні апарати проєктують з нульовою плавучістю, тому впливи сил ваги та плавучості проявляються лише моментом сили плавучості.

2.3.5. Математична модель рушійної частини РСК АНПА.

2.3.5.1. Рушійна сила та момент. У дисертації розглядається АНПА, який має один рушій – ГГ контрроторного обертання, та упор якого спрямований в центр мас АНПА уздовж його зв'язаної осі x . Тому загальне матричне рівняння сил і моментів рушійної частини РСК [64] для цього АНПА буде мати вигляд:

$$T_{PC} = [F_{ГГ} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

де: T_{PC} – матриця сил та моментів рушійного пристрою АНПА; $F_{ГГ}$ – упор, який створюється гребним гвинтом контрроторного обертання.

Такий РСК не створює обертових моментів (керування за обертовими ступенями свободи здійснюється за допомогою гідродинамічних рулів).

2.3.5.2. Математична модель привода рушійної частини РСК АНПА. Основними складовими рушійної частини РСК є електродвигун (ЕД), редуктор і валопровід (РВ) та ГГ. Досвід моделювання такої електромеханічної системи АНПА свідчить, що для спрощення її математичної моделі можна нехтувати змінними другого порядку малості, до яких відносяться електромагнітні процеси в ЕД, а також сили тертя у валопроводі.

Тоді ЕД як джерело механічної енергії для рушійної частини РСК можна спрощено описати диференціальним рівнянням першого порядку – рівнянням руху привода з коефіцієнтом підсилення K_{ED} :

$$\begin{aligned}
 J_p \frac{d\omega_{ГГ}}{dt} &= K_{ED} u - Q_{ГГ}; \\
 Q_{ГГ} &= \begin{cases} \frac{K_Q \rho D^5}{4\pi^2} \omega_{ГГ}^2, & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_q \rho D^3 v_{ГГ}^2, & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\
 F_{ГГ} &= \begin{cases} \frac{K_F \rho D^4}{4\pi^2} \omega_{ГГ}^2, & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_f \rho D^2 v_{ГГ}^2, & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\
 J &= \frac{2\pi v_p}{\omega_{ГГ} D}, \tag{2.24}
 \end{aligned}$$

де: u – керуючий сигнал регулятора ЕД; $\omega_{ГГ}$ – кутова швидкість обертання ГГ; J_p – сумарний момент інерції системи "ЕД – РВ – ГГ", приведений до ГГ; $Q_{ГГ}$ – гальмівний момент ГГ; $F_{ГГ}$ – упор ГГ; $K_Q(J)$ та $K_q(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують гальмівний момент гребного гвинта; $K_F(J)$ та $K_f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують упор гребного гвинта; J – відносний поступ ГГ; D – діаметр ГГ; ρ – густина води; v_p –

проекція вектора швидкості переміщення рушійної частини РСК АНПА відносно води на вісь прямого ходу ГГ.

Коефіцієнти K_Q , K_q , K_F , K_f є нелінійними і визначаються в залежності від параметрів J , $\omega_{ГГ}$ та $v_{ГГ}$. [71].

2.3.6. Керуючі сили і моменти хвостового оперення.

2.3.6.1. Математична модель хвостового оперення. АНПА обладнано хвостовим оперенням (вертикальним і горизонтальним стернами), елементи якого моделюватимемо як гідродинамічні крила (ГК). Моделювання впливу ГК зводиться до урахування його підйомної сили та сили лобового опору [71].

1.1.1 Для моделювання впливу ГК на АНПА введемо систему координат $O_w x_w y_w z_w$, зв'язану з ГК, позначимо її базис літерою W . Її вісь абсцис спрямовується проти лобового опору ГК, вісь ординат спрямовується в напрямку підйомної сили ГК, вісь аплікату утворює з першими двома праву прямокутну систему координат.

Сили ГК визначаються в системі координат ГК (в базисі W):

$$\vec{F}_w = \{F_{wx}, F_{wy}\}_W;$$

$$\vec{v}_w = \{v_{wx}, v_{wy}\}_W;$$

$$F_{wx} = -0,5C_x(\alpha)\rho v_{wx}^2 S;$$

$$F_{wy} = -0,5C_y(\alpha)\rho v_{wx}^2 S,$$

де: \vec{F}_w – вектор сили, яку створює ГК; \vec{v}_w – вектор швидкості руху ГК по відношенню до води; $C_{x,y}$ – гідродинамічні коефіцієнти відповідно опору і піднімальної сили ГК; α – кут атаки ГК; S – площа ГК.

Обертальний момент, який виникає на корпусі АНПА під дією ГК, визначається за формулою

$$\vec{M}_w = \vec{r}_w \times \vec{F}_w,$$

де \vec{r}_w – радіус вектор, який з’єднує центр мас АНПА та точку прикладення рівнодіючої сили ГК.

Гідродинамічні коефіцієнти $C_{x,y}$ залежать від кута атаки α , визначаються шляхом модельних випробувань у дослідницьких басейнах, мають нелінійний характер і приводяться в довідковій літературі для типових профілів крил [71].

Швидкість руху ГК відносно води залежить від поступальної \vec{v} та обертової $\vec{\omega}$ швидкостей АНПА:

$$\vec{v}_w = \vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{r}_w.$$

При обертанні АНПА швидкість обтікання ГК потоком для різних точок ГК буде відрізнятись, оскільки вони перебувають на різній відстані від центру мас АНПА.

Але, якщо хорда ГК набагато менша за відстань між ГК і центром мас АНПА, тоді їх швидкість можна прийняти однаковою. Математична модель ГК застосовується для моделювання кормового хвостового оперення АНПА. Сили та моменти гідродинамічних крил, встановлених на АНПА, переводяться в ЗСК, після чого їх можна застосовувати для формування відповідних матриць для підстановки в основний закон динаміки АНПА.

2.3.7. Імітаційна модель АНПА.

2.3.7.1. Структура моделі АНПА. Структуру імітаційної моделі розробимо з урахуванням особливостей взаємодії елементів АНПА шляхом з’єднання входів та виходів модулів, які моделюють окремі елементи складових АНПА (рис. 2.1) [72]. Математична модель складається з моделі основного закону динаміки АНПА та математичних моделей гідродинамічних впливів (ГДВ), математичних моделей хвостового оперення (ХО) у складі вертикального і горизонтального стерен, та рушійного пристрою, які

утворюють математичну модель рушійно-стернового комплексу (РСК), моделі впливу сил тяжіння та плавучості (СТП).

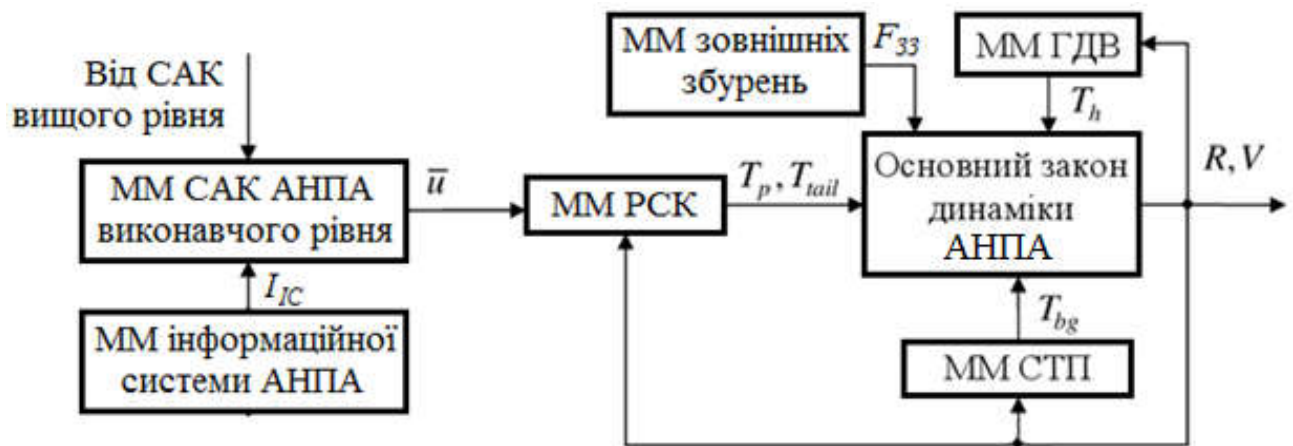


Рисунок 2.1 – Функціональна схема математичної моделі АНПА

Керуючим впливом для АНПА є вектор-рядок \bar{u} , сигнали якого потрапляють на вхід моделі рушійно-стернового комплексу (РСК) і визначають величину рушійної сили та кути повороту елементів ХО, тим самим дає змогу здійснювати кероване переміщення АНПА в просторі.

Елементи матриці сил та моментів T , тобто вектори \vec{F} та \vec{M} , утворюються за принципом суперпозицій [73]:

$$T = T_h + T_{gb} + T_{tail} + T_p,$$

де: T_h – матриця гідродинамічних (в'язких) сил та моментів; T_{gb} – матриця сил та моментів тяжіння і плавучості; T_{tail} – матриця сил та моментів ХО; T_p – матриця сил (та для загального випадку моментів) РП.

Всі елементи цих матриць задаються в проєкціях на осі ЗСК.

2.3.7.2. Сили та моменти ХО АНПА проєкту «Сканер». Корпус АНПА має форму, близьку до циліндра, та обладнаний двома горизонтальними керуючими крилами хвостового оперення (ХО).

Горизонтальне та вертикальне керуючі стерна (КС), які є елементами ХО, розташовуються в кормовій частині АНПА, що надає можливість створювати керовані моменти ристання та диференту.

У зв'язку з обраною конфігурацію гідродинаміки АНПА матриці сил та моментів ХО матимуть наступний вигляд:

$$T_h = \begin{bmatrix} F_{hx} & F_{hy} & F_{hz} & M_{hx} & M_{hy} & M_{hz} \end{bmatrix}^T;$$

$$T_v = \begin{bmatrix} F_{vx} & F_{vy} & F_{vz} & M_{vx} & M_{vy} & M_{vz} \end{bmatrix}^T;$$

$$T_{tail} = T_h + T_v = \begin{bmatrix} F_{tail(x)} & F_{tail(y)} & F_{tail(z)} & M_{tail(x)} & M_{tail(y)} & M_{tail(z)} \end{bmatrix}^T,$$

де: T_h , T_v – матриці сил та моментів відповідно горизонтального та вертикального стерна; F_{hx} , F_{hy} , F_{hz} , M_{hx} , M_{hy} , M_{hz} – відповідно проєкції векторів сили та моменту горизонтального стерна; F_{vx} , F_{vy} , F_{vz} , M_{vx} , M_{vy} , M_{vz} – відповідно проєкції векторів сили та моменту вертикального стерна; $F_{tail(x)}$, $F_{tail(y)}$, $F_{tail(z)}$, $M_{tail(x)}$, $M_{tail(y)}$, $M_{tail(z)}$ – відповідно проєкції векторів сили та моменту ХО на осі ЗСК.

2.3.7.3. Математична модель системи керування ХО АНПА. Керуючим впливом для АНПА проєкту «Сканер» є вектор-рядок \bar{u} :

$$\bar{u} = \{u_F, u_h, u_v\}; u_F \in [-1, 1]; u_h \in [-1, 1]; u_v \in [-1, 1],$$

де: u_F – сигнал керування рушійним пристроєм; u_h – сигнал керування приводом повороту горизонтального стерна; u_v – сигнал керування приводом повороту вертикального стерна.

Для повороту стерна застосовується швидкодіючий автоматизований електропривод, динамічні характеристик якого значно вищі від динамічних характеристик ЗК АНПА як твердого тіла у потоці води. Тому перехідними

процесами у такому електроприводі можна знехтувати, що дає можливість прийняти його математичну модель у вигляді:

$$\alpha_{h,v} = Ku_{h,v}$$

де: $\alpha_{h,v}$ – відповідно, кути повороту горизонтального та вертикального стерна відносно корпусу АНПА; K – коефіцієнт підсилення електропривода КС; $u_{h,v}$ – виходи задавачів інтенсивності відповідно для горизонтального та вертикального стерна.

При від’ємних значеннях $u_{h,v}$ кути $\alpha_{h,v}$ мають додатні значення, що створюватиме диферент на ніс АНПА і змушуватиме його заглиблюватись та рискання на правий борт і змушуватиме його повертати праворуч. При додатних значеннях керуючих впливів АНПА отримуватиме диферент на корму і буде спливати та рискання на лівий борт і буде повертати ліворуч.

Такий вибір знаку коефіцієнту K зроблено для того, щоб знак керуючого впливу відповідав знаку прискорення за керованими обертальними ступенями свободи АНПА.

2.4 Математичне моделювання керованого руху одиночного АНПА як «агента» групи

Виходячи з головних задач автоматизації групового застосування АНПА, сформульованих у розділі 1, для першого напрямку C_{Ag} автоматизації Со-Со-Ро-технологій актуальною задачею є керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

Для другого напрямку C_{Gr} автоматизації Со-Со-Ро-технологій значну актуальність представляють:

- автоматизація процесів групового руху АНПА при виконанні пошукових робіт (головне зпризначення групи АНПА);

- автоматизація керування окремими видами морських пошукових операцій, до яких, у першу чергу, віднесемо керування роботою морського безекіпажного комплексу (МБК), що реалізує базову технологію виконання морських підводних місій пошукового характеру.

Розглянемо особливості математичного моделювання наведених задач автоматизації.

2.4.1. Моделювання процесів керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА. Зазначимо, що питання математичного моделювання групового руху АНПА постійно знаходяться у центрі уваги дослідників. Так, у роботі [74] наводяться рівняння руху суден та підводних апаратів у вигляді стандартних гідродинамічних моделей. У роботі [75] описано комп'ютерний тренажер, розроблений для пришвидшення синтезу та перевірки працездатності САК АНПА. Однак, в зазначених роботах особливості організації безаварійного руху групи АНПА не розглядаються.

У роботі [76] з метою розробки системи симуляції високоточного АНПА для відпрацювання алгоритмів наведення, навігації та управління розроблено загальну математичну модель динаміки АНПА, яка включає міждисциплінарне вивчення кінематики, гідростатики та гідродинаміки. Проте, автор не аналізує особливості моделювання руху АНПА у складних навігаційних умовах (наявність статичних і динамічних перешкод тощо).

В [77] запропоновано САК групою АНПА, що враховує обмеження зв'язку в підводному середовищі. Особливістю системи є можливість спільного використання обчислювальних ресурсів групи усіма її апаратами.

Європейський проект MORPH пропонує концепцію підводної роботизованої системи, яка виникає з інтеграції різних мобільних робототехнічних модулів з додатковими ресурсами [78]. Кожним вузлом блоків (набір невеликих і дешевих роботизованих морських апаратів) MORPH є АНПА, який здатний виконувати деякі завдання з наперед заданого переліку.

Однак, вказані публікації мають інформаційно-довідковий характер і не дають уявлення про науково-технічні рішення щодо САК.

Найбільш повно питання комп'ютерного дослідження групового руху АНПА розглянуто у [79]. Автори сформулювали головні задачі створення спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження системи автоматичного керування одиночним АНПА і групою АНПА в умовах нестаціонарності власних параметрів підводного апарата й невизначеності зовнішніх збурювань.та запропонували багаторівневу структуру такого комплексу. Однак, питання моделювання безпечного групового руху АНПА автори залишили поза увагою.

Тому нижче у роботі запропоновано математичну модель та структуру системи автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА, яка призначена для дослідження ефективності законів безпечного руху АНПА при виконанні підводних місій пошукового типу [80].

2.4.2. Розробка структури нечіткої системи автоматичного керування одиночним АНПА як «агентом» групи. Під час групового руху необхідно, щоб кожен АНПА утримував безпечну дистанцію з сусідніми апаратами у заданому діапазоні відстаней, коли мінімальна дистанція між ними не створює загрозу аварійного зіткнення (режим адгезії), а максимальна дистанція гарантує збереження групи та не створює загрозу відходу окремого апарату від інших АНПА на дистанцію втрати зв'язку з ними (режим когезії, сегрегації) [81].

Крім того, після завершення маневрування і забезпечення заданої відстані АНПА має стати на попередній заданий курс (режим вирівнювання).

Застосування нечіткої логіки забезпечує підхід до синтезу необхідної системи керування (нечітке керування), та гарантує можливість вирішення широкого кола проблем, у яких дані, цілі й обмеження є занадто складними або нечітко визначеними й у силу цього не піддаються точному математичному опису [82].

Під нечітким керуванням розуміється стратегія керування, заснована на емпірично придбаних знаннях щодо функціонування об'єкта (процесу), представлених у лінгвістичній формі у вигляді деякої сукупності правил.

Відомо, що узагальнена процедура синтезу нечіткої системи автоматичного керування може бути представлена наступними етапами [82]:

- визначення множини цілей, які ставляться перед системою керування;
- уточнення множини вхідних й вихідних змінних нечіткого регулятора;
- визначення можливих ситуацій в роботі синтезованої системи;
- формування бази правил;
- вибір методу фазифікації змінних;
- вибір механізму виводу і методів дефазифікації.

Для керування маневровим рухом АНПА, особливо, якщо він працює у групі, що виконує спільну місію, застосування класичних методів керування не надасть належної точності.

Необхідно також враховувати значну нелінійність параметрів, які необхідно контролювати. Застосування нечіткої логіки дозволяє вирішити ряд проблем, не застосовуючи класичну лінеаризацію.

Лінійний неперервний ПД-регулятор $y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ можна замінити близьким по стратегії та логіці керування нечітким регулятором, якщо в якості його вихідної змінної розглядати значення керуючого впливу $y(t)$: $y(k) = K_p \varepsilon(k) + K_d \Delta \varepsilon(k)$.

Таким чином, для вхідних змінних $\varepsilon(t)$, $\Delta \varepsilon(t)$ та вихідної змінної $y(t)$ може бути синтезовано нечіткий пропорційно-диференційний регулятор, що реалізує нелінійний закон $y(t) = F[\varepsilon(t), \Delta \varepsilon(t)]$ та є еквівалентним ПД-регулятору.

Тому розробка математичної моделі для дослідження маневрового руху АНПА, реалізованого за принципами нечіткої логіки, є на даний час досить актуальною задачею.

Одним з основних завдань керування групою АНПА є забезпечення режиму узгодженого руху апаратів по заздалегідь заданому курсу або траєкторії. При цьому важливо підтримувати режими адгезії і сегрегації [81].

Для узгодження роботи «агентів», що виконують спільну місію, пропонується система керування, яка має наступну структуру [80] (див. рис. 2.2).

Дана система складається з двох основних регуляторів: регулятора, що контролює дистанцію між агентами, та регулятора курсу. В усталеному режимі одиночний АНПА рухається заданими для групи курсом Ψ_3 та швидкістю v_x .



Рисунок 2.2 – Структурна схема САК рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА

Якщо один із сусідніх апаратів змінює свій курс та починає віддалятися або наближатися до іншого «агента», сенсори нашого апарата фіксують зміну умов руху і його регулятори виробляють нову, тимчасову, траєкторію руху.

Блок сенсорів дистанції нашого АНПА формує множину дистанцій до найближчої цілі $d_s = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]$. Дистанція до цілі визначається виразом:

$$\begin{cases} d = (d_{\min 1} + d_{\min 2}) / 2; \\ d_{\min 1} = d_i \mid_{|d_i - d_{i+1}| \rightarrow \min}; \\ d_{\min 2} = d_{i+1} \mid_{|d_i - d_{i+1}| \rightarrow \min}, \end{cases} \quad (2.20)$$

де $d_{\min 1}$, $d_{\min 2}$ – показники пари сенсорів дистанції, різниця значень яких мінімальна, м; $i = 1..3$.

Для вирішення поставленої задачі застосовуються нечіткі регулятори. Регулятори дистанції та курсу є нечіткими ПД-регуляторами типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги. Вхідними параметрами для регулятора дистанції є відхилення $\varepsilon_d = d_3 - d$ і похідна відхилення $\dot{\varepsilon}_d$, обчислена за методикою [83], яка передбачає фільтрацію сигналів, що отримуються.

Змінна ε_d представлена наступними лінгвістичними термами (рис. 2.3): втрата об'єкта (Out Of Range), віддалення об'єкта (Miss), узгоджений рух (Track), наближення об'єкта (Danger).

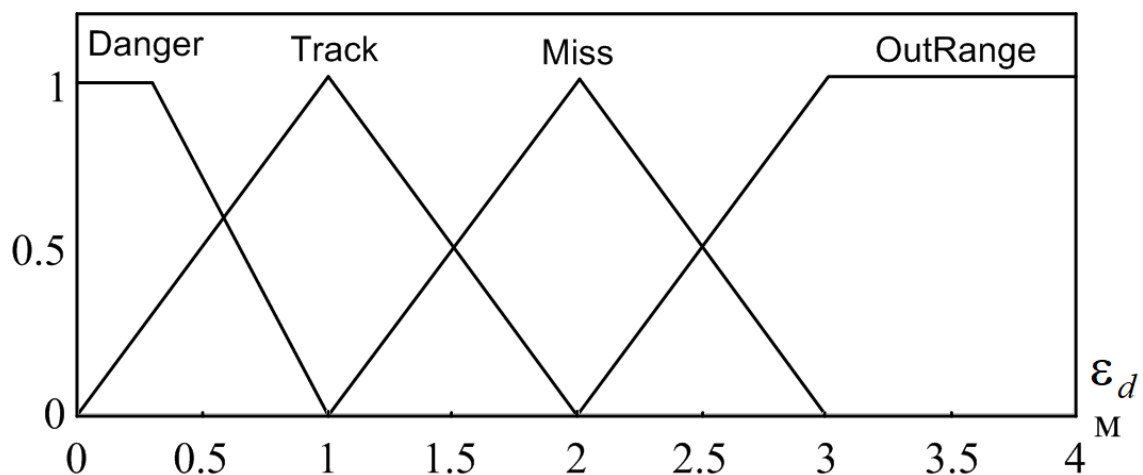
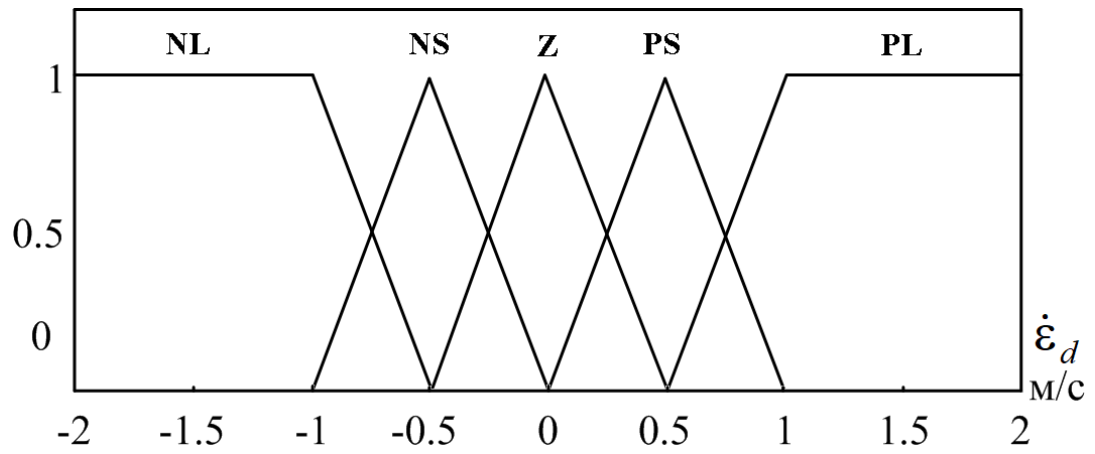
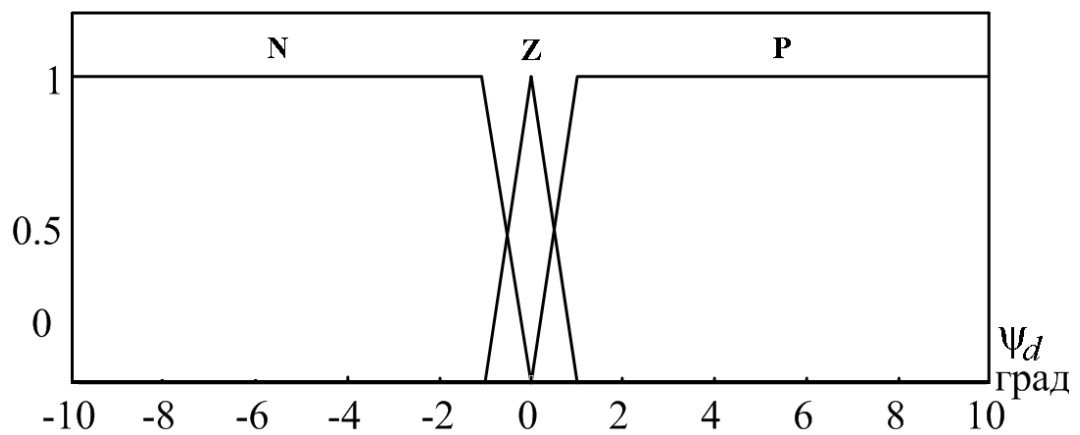


Рисунок 2.3 – Функція належності змінної ε_d

Змінна $\dot{\varepsilon}_d$ представлена наступними термами: негативне велике (NL), негативне мале (NS), нульове (Z), позитивне мале (PS), позитивне велике (PL) рис 2.4.

Виходом регулятора є відхилення Ψ_d від заданого курсу Ψ_3 , яке представлено наступними термами: негативна (N), нульова (Z), позитивна (P) рис. 2.5.

База правил нечіткого регулятора зведена до таблиці 2.1

Рисунок 2.4 – Фунція належності змінної $\dot{\varepsilon}_d$ Рисунок 2.5 – Фунція належності вихідної змінної ψ_d

Таблиця 2.1 – База правил регулятора дистанції

$\dot{\varepsilon}_d \backslash \varepsilon_d$	Danger	Track	Miss	Out Of Range
NL	N	N	Z	Z
NS	N	Z	P	Z
Z	N	Z	P	Z
PS	N	Z	P	Z
PL	Z	Z	P	Z

Нечітка поверхня регулятора представлена на рис 2.6.

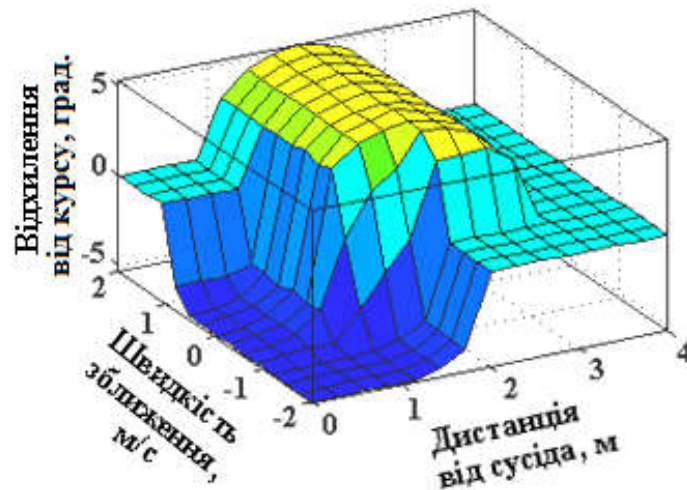


Рисунок 2.6 – Поверхня нечіткого виходу регулятора дистанції

Регулятор курсу, в свою чергу, отримує на вході сигнал керування Ψ_c та сигнал Ψ від сенсора курсу.

На виході регулятор курсу формує сигнал керування u для РСК АНПА.

Математичне моделювання розробленої системи керування виконано в системі Simulink середовища Matlab.

На рис. 2.7 представлено структурну схему САК, що дозволяє дослідити роботу власного АНПА у сукупності із АНПА-сусідом, що відхилився від заданого курсу.

Розроблена математична модель дозволяє утримувати об'єкт керування на деякому віддаленні від встановленого АНПА-сусіда.

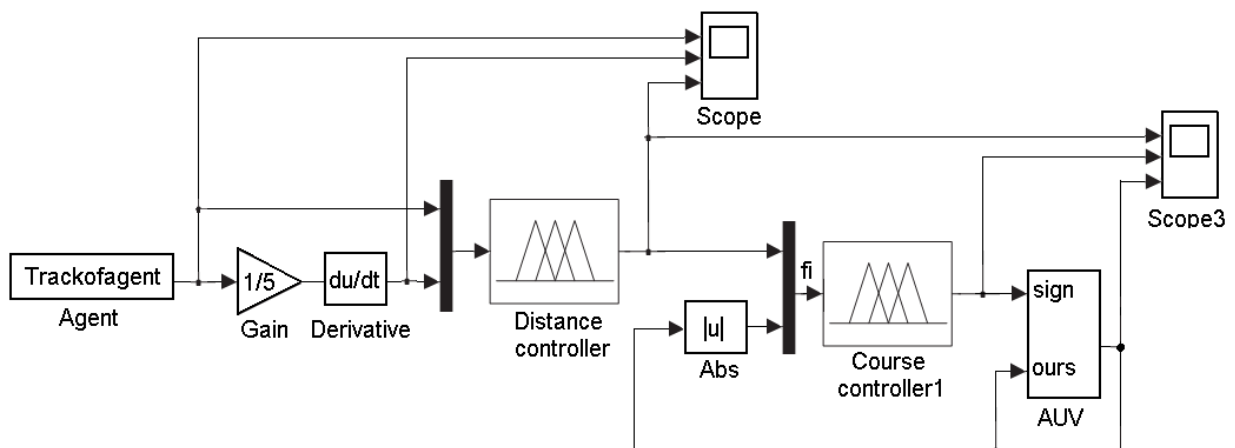


Рисунок 2.7 – Структурна схема САК АНПА, реалізована в системі Simulink

При цьому, регулятор дистанції контролює наближення або віддалення АНПА-сусіда з заданою точністю керування (в даному випадку 0,5 м.), а регулятор курсу формує нову траєкторію руху для власного АНПА. Сигнал, що надходить від регулятора дистанції, визначається наступними термами:

(ОВ) – від’ємний великий кут (об’єкт віддаляється стрімко, на велику відстань);

(ОМ) – від’ємний малий кут (об’єкт поступово віддаляється);

(Track) – об’єкт рухається у межах заданої траєкторії;

(РМ) – додатній малий кут;

(РВ) – додатній великий кут, рис. 2.8.

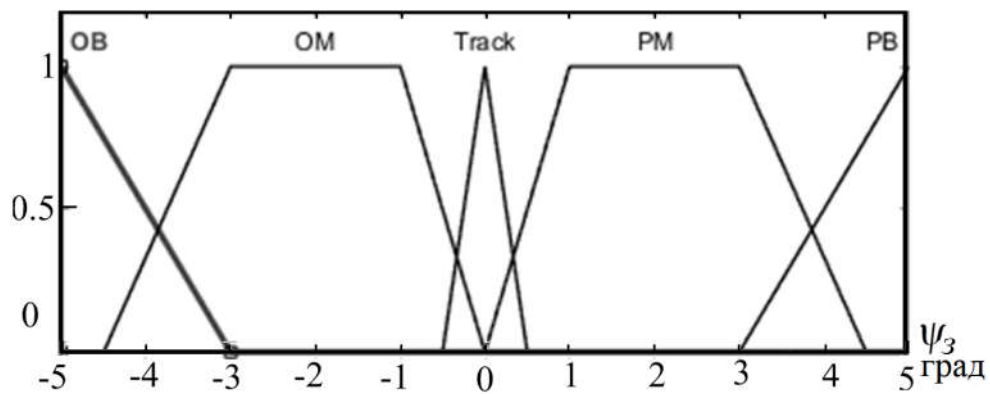


Рисунок 2.8 – Терми сигналу «кут відхилення»

Наступним кроком даний сигнал порівнюється із сигналом від сенсора курсу, який в свою чергу, визначає похибку від найближчого АНПА-сусіда та кут перекладки стерна АНПА, рис. 2.9.

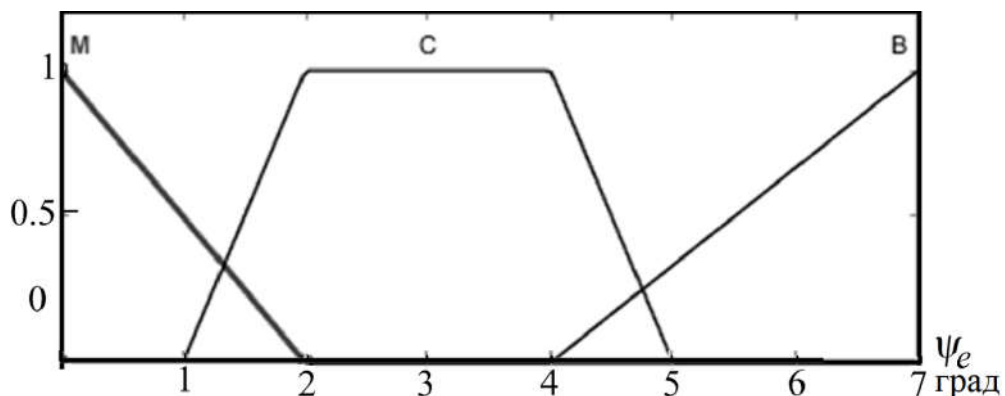


Рисунок 2.9 – Терми похибки регулювання

На виході маємо вектор, який визначає напругу, що подається на гребний двигун РСК АНПА (визначає швидкість руху апарату), та кут повороту стерна, що дає змогу формувати нову траєкторію руху, рис. 2.10.

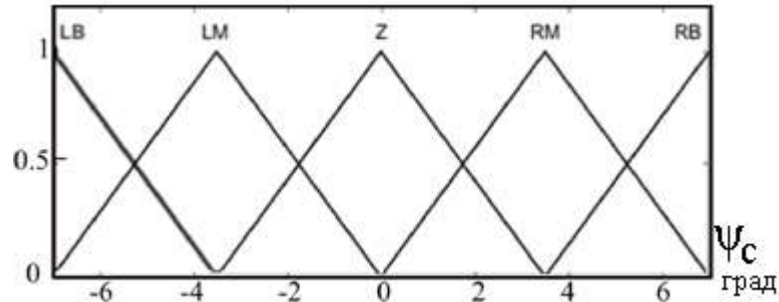


Рисунок 2.10 – Визначення вихідного керуючого сигналу

Проведемо моделювання ситуації в режимі адгезії, коли управляючі дії, що формуються САК, будуть спрямовані на збільшення дистанції до АНПА-сусіда.

База правил нечіткого регулятора курсу зведена до таблиці 2.2 (R – вправо, Z – нуль, L – вліво), а поверхня нечіткого виводу показана на рис. 2.11.

Таблиця 2.2 – База правил регулятора курсу

$\dot{\varepsilon}_d$ \ ε_d	OB	OM	Track	PM	PB
М (мале)	RM	RM	Z	LM	LM
С (середнє)	RB	RM	Z	LM	LB
В (велике)	RB	RB	Z	LB	LB

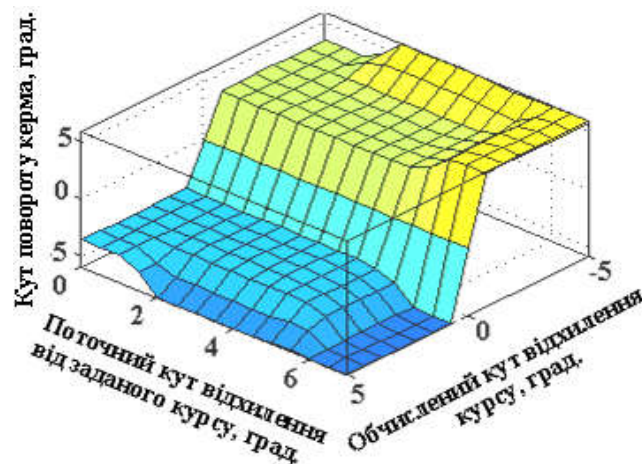


Рисунок 2.11 – Поверхня нечіткого виводу регулятора курсу

На рис. 2.12 представлені графіки перехідного процесу (верхня крива – дистанція, нижня крива – керуючий вплив).

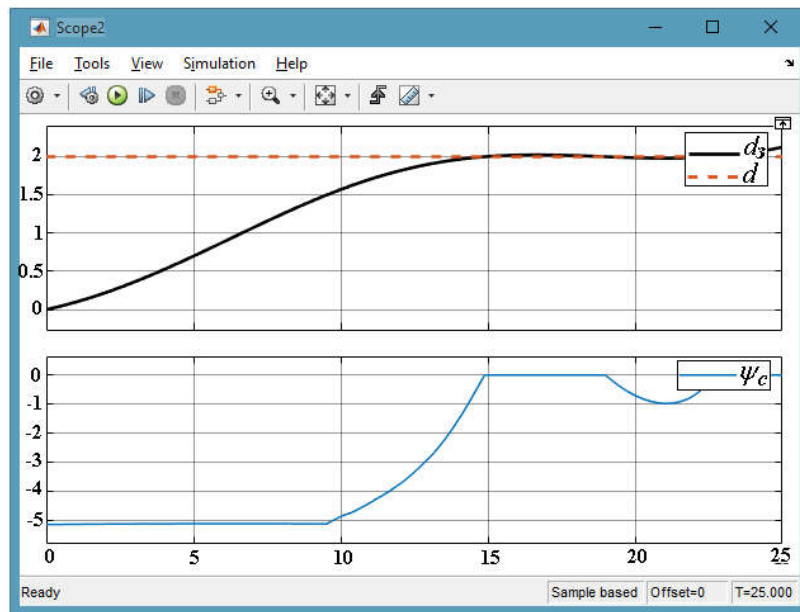


Рисунок 2.12 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії

Математичне моделювання роботи регулятора дистанції на нечіткій логіці в режимі адгезії. В даному випадку перерегулювання практично дорівнює нулю. Це пояснюється відсутністю зовнішнього збурення. Керуючий вплив має більш плавний вигляд, оскільки немає необхідності підрулювати, щоб утримувати апарат на заданій траєкторії.

Проведемо моделювання ситуації в когезії, тобто керуючі впливи, що формуються САК, будуть спрямовані на зменшення дистанції до об'єкта (сусіда). На рис. 2.13 представлені графіки перехідного процесу (верхня крива – дистанція, нижня крива – керуючий вплив).

Перевірку ефективності регулятора проведемо для випадку, коли заданий об'єкт (наприклад, інший АНПА) буде рухатись по синусоїдальній траєкторії, а контрольований АНПА буде триматись від нього на встановленій відстані (див. рис.2.14 (дистанція – верхня крива; керуючий вплив – нижня крива)).

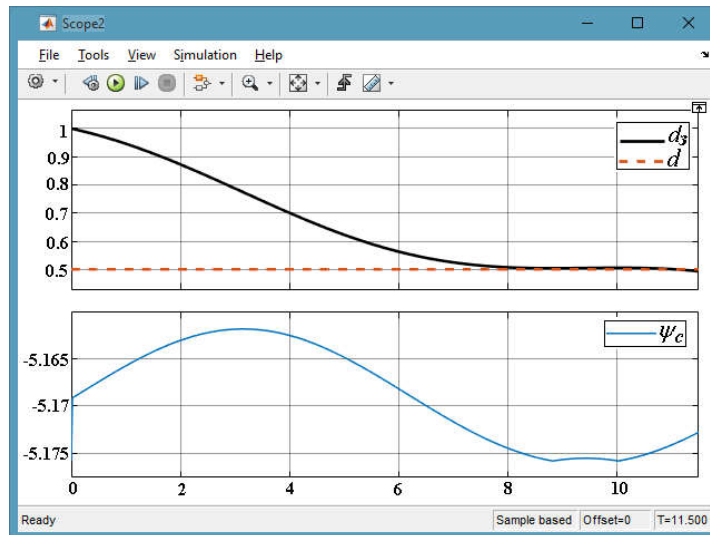


Рисунок 2.13 – Графіки перехідного процесу в режимі когезії

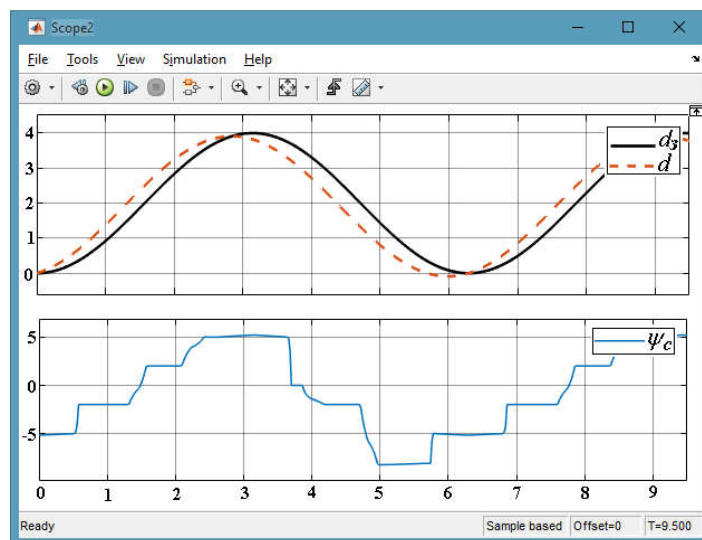


Рисунок 2.14 - Графіки перехідних процесів при гармонійному сигналі керування

Сукупність цих сигналів формує керуючий вплив на РСК, що змінює траєкторію руху АНПА.

Як видно з результатів моделювання апарат змінює траєкторію руху, коли АНПА-сусід порушує встановлений діапазон відхилення.

Таким чином, отримана математична модель та її комп'ютерна реалізація можуть бути використані як складова спеціалізованого моделюючого комплексу при дослідженні ефективності САК рухом одиночного АНПА як «агента» у складі групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

2.4.2. Моделювання групового руху АНПА при виконанні пошукових робіт. Ефективність спільної роботи АНПА в групі суттєво залежить від точності розв'язку завдання навігації й локалізації АНПА в групі. Для реалізації групового керування, організації необхідного навігаційного забезпечення для всіх АНПА групи, використовуються гідроакустичні навігаційні системи (ГАНС) з довгою, короткою або ультракороткою базою. Це дає можливість визначати далекомірні й кутові параметри АНПА.

Часто для підвищення мобільності навігаційного комплексу використовують мережі сонарних маяків, що рухаються по поверхні моря й визначають своє розташування з використанням супутникової системи навігації (GNSS - Global Navigation Satellite System) [84].

На рис. 2.15 показана група різнорідних АНПА, де один центральний (ведучий) АНПА за допомогою радіогідроакустичних буїв (РГАБ) забезпечує GNSS-інформацією більш дешеві АНПА, які обладнані найпростішими навігаційними сенсорами. У якості РГАБ можуть бути використані буї вітчизняного виробництва [85].

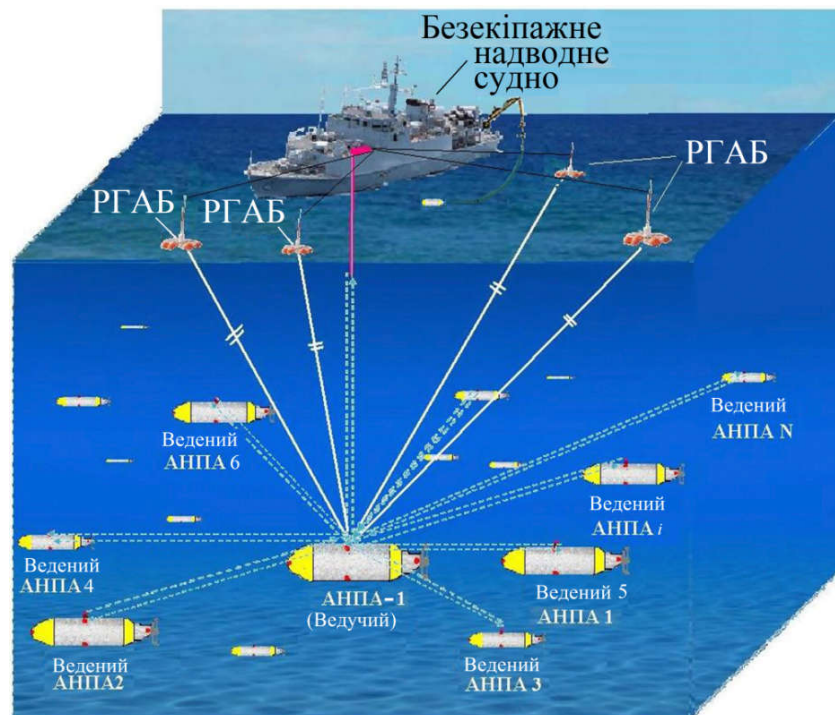


Рисунок 2.15 – Типове просторове розташування групи АНПА

На таких АНПА встановлюються відповідні гідроакустичні пінгери (прилади запиту-відповіді), які випромінюють імпульси при русі, що дає можливість обчислювати місцезнаходження апарата (координати у підводному просторі).

Використовуючи РГАБ, АНПА-1 може одержати точну позицію по GNSS-сигналах, не піднімаючись на поверхню, щоб періодично калібрувати своє положення.

Інші АНПА (ведені) можуть отримувати інформацію про своє точне положення через гідроакустичний зв'язок з центральним АНПА.

Часто замість РГАБ використовують систему донної гідроакустичної навігації. Така система включає мережу донних гідроакустичних маяків (ДГМ), географічні координати установки яких заздалегідь відомі (див. рис. 2.16).

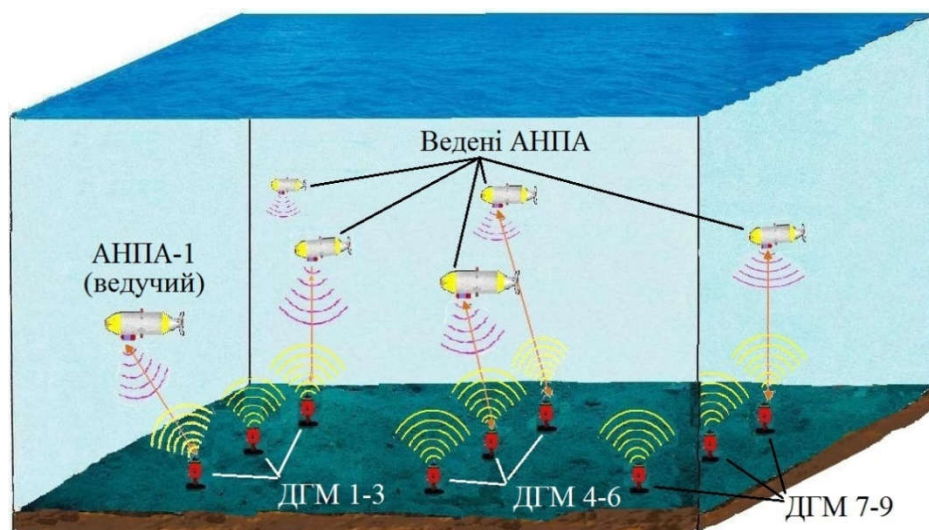


Рисунок 2.16 – Схема використання системи донної гідроакустичної навігації для групи АНПА

Тоді координати АНПА легко обчислюються на основі аналізу затримки сигналів від ДГМ.

Виходячи з поставлених у задач дисертації математичне моделювання процесів автоматичного керування рухом групи АНПА у складі одного ведучого та $N-1$ ведених АНПА має проводитись на 4-х ієрархічних рівнях:

- виконавчому рівні E , де в автоматичному режимі має перевірятись функціонування одиночного АНПА як об'єкта керування; очевидно, що цей рівень притаманний як ведучому АНПА-1, так і кожному з ведених АНПА;
- базовому рівні B автоматизації (задача L_{Ag} згідно (1.1)) для перевірки ефективності системи автоматичного керування рухом одиночного АНПА в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів його групи;
- локальному рівні L групового керування АНПА (задача B_{Gr} згідно (1.2)), на якому виконується аналітична та алгоритмічна підготовка та подальше автоматичне виконання, власне, підводної пошукової операції;
- глобальному рівні G автоматизації підводних пошукових технологій (задача L_{Gr} згідно (1.2)), де має виконуватись планування та виконання морської пошукової операції з використанням групи АНПА, що має підвищити продуктивність пошукових операцій на віддалених акваторіях.

Узагальнена структура моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА, що виконують підводну пошукову місію, наведена на рис. 2.17.

Розглянемо зміст на особливості функціонування вказаної структури.

Математична модель ММ-1 поста дистанційного керування групою автономних ненаселених підводних апаратів відображає процеси за участю людей-операторів з генерування множини M_{UM} підводних місій $M_{UMi} \subset M_{UM}$ для конкретної групи ведених АНПА, які вони мають виконувати під керівництвом ведучого АНПА-1.

Зазвичай, ці процеси містять формування масивів даних про гідрологію A_{Hi} i -ї робочої акваторії та гідрологію A_{Wi} акваторії переходу до неї від місця випуску групи автономних ненаселених підводних апаратів, про характеристики об'єктів пошуку Z_{Wij} , розташованих на цих акваторіях, та про вимоги щодо обстеження і документування R_{Wij} :

$$M_{UMi} = \{A_{Hi}; A_{Wi}; Z_{Wij}; R_{Wij}\}. \quad (2.21)$$

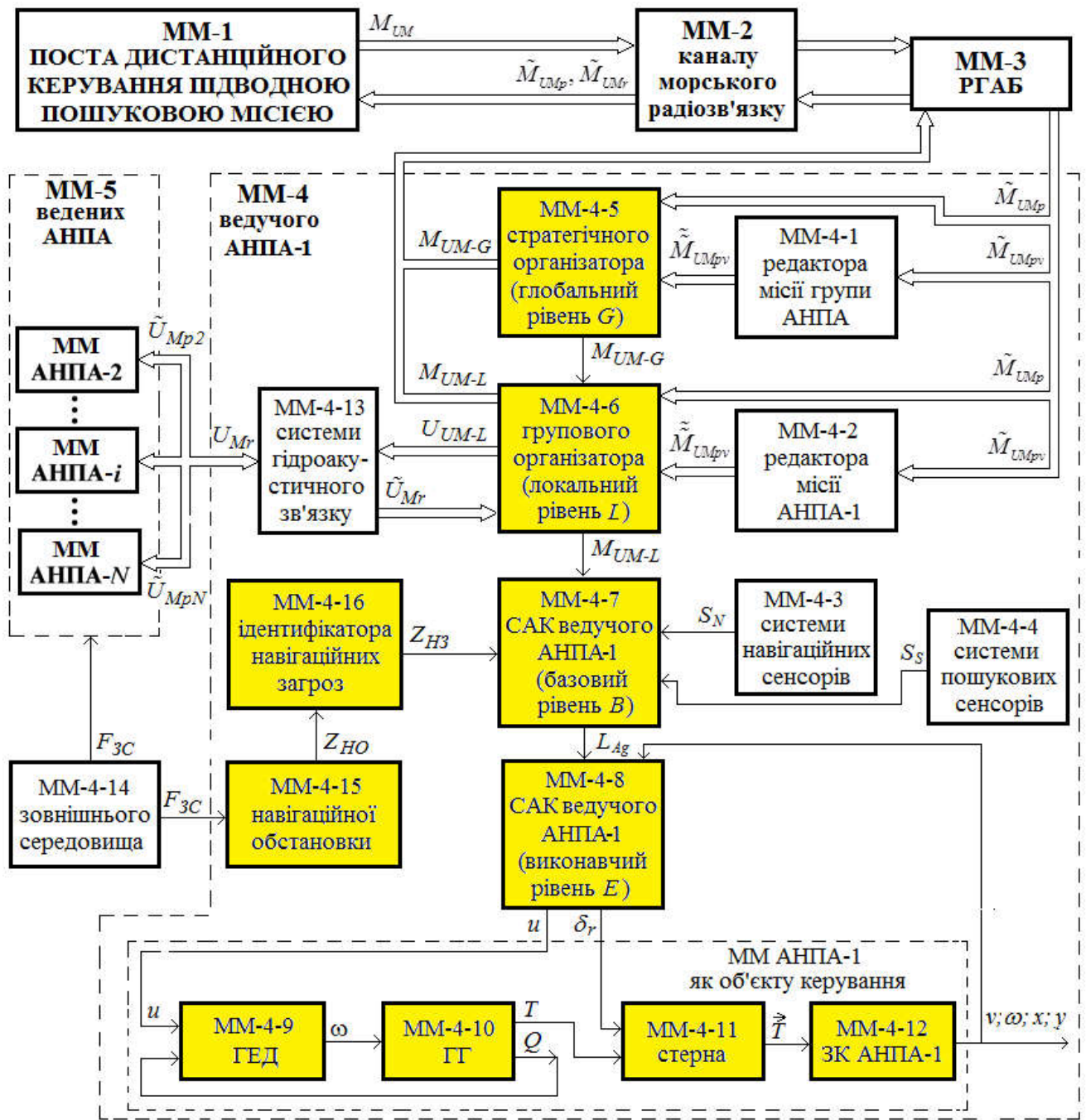


Рисунок 2.17 – Узагальнена структура моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА, що виконують спільну підводну пошукову місію (структурні блоки САК, які досліджуються далі у дисертації, виділені заливкою)

Вхідною інформацією для MM-1 є відомості про результати фактичного планування \tilde{M}_{UMp} та виконання \tilde{M}_{UMr} групою АНПА завдань глобального G та локального L ієрархічних рівнів, що надходять від MM-2 і MM-3.

Вказані моделі враховують функціонування каналу морського зв'язку (ММ-2) і (каналу радіогідроакустичного зв'язку РГАБ (ММ-3).

Знак «тильда» вказує на те, що множини розроблених в САК АНПА-1 алгоритмів керування \tilde{M}_{UMp} та результатів їх виконання надійшли з деякими обмеженнями, обумовленими роботою каналів радіо- та гідроакустичного зв'язку (див. відношення (2.22) нижче).

Математичні моделі ММ-2 та ММ-3 для розв'язку завдань дисертаційного дослідження представлені описом двох головних їх властивостей:

пропускної здатності I_{MM-2} та I_{MM-3} ;

часової затримки процесів передачі/прийому інформації ΔT_{MM-2} та ΔT_{MM-3} .

У дисертації прийнято припущення про однакові кількісні характеристики цих властивостей у прямому і зворотному напрямках.

Результатом роботи моделей ММ-2 і ММ-3 є інформаційні потоки про результати фактичного планування \tilde{M}_{UMp} та виконання \tilde{M}_{UMr} множини підводних місій M_{UM} :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{M}_{UMp} &= f_{UMp}(I_{MM-4-2}; I_{MM-4-3}; \Delta T_{MM-4-2}; \Delta T_{MM-4-3}); \\ \tilde{M}_{UMr} &= f_{UMr}(I_{MM-4-2}; I_{MM-4-3}; \Delta T_{MM-4-2}; \Delta T_{MM-4-3}). \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Розробка математичних моделей ММ-2 і ММ-3 є тривіальною задачею моделювання радіо- та гідроакустичних каналів зв'язку [86, 87] і в роботі не розглядається.

Математичні моделі ведучого та ведених АНПА (ММ-4 та ММ-5) є основними об'єктами дослідження і характеризуються найбільшою складністю. Розглянемо їх більш детально.

Присутність математичних моделей ММ-4-1 і ММ-4-2 в узагальненій структурі моделюючого комплексу пояснюється імовірною необхідністю коригування пошукових місій ($M_{UMpv} \subset M_{UM}$) при моделюванні роботи групи

АНПА в умовах стисненої підводної навігації (наявності перешкод природного чи антропогенного походження); знак «подвійна тильда» означає, що місія M_{UMpv} відкоригована, виходячи з можливостей групи АНПА. У дисертації вказані умови не досліджуються.

Математичні моделі ММ-4-3 і ММ-4-4 дають змогу досліджувати вплив систем навігаційних сенсорів S_N (давачів курсу, лінійних та кутових швидкостей і прискорень тощо) і пошукових сенсорів S_S (фото-, відео- та гідроакустичних приладів, магнітометрів тощо) на ефективність роботи САК АНПА-1. Вказані моделі використовують відомі залежності для оцінки похибок навігаційних систем GNSS $S_N=f(\Delta_{GNSS})$ [84] та INS (Inertial Navigation System) $S_S=f(\Delta_{INS})$ [88] і тут не наводяться.

Крім того, математична модель ММ-4 ведучого АНПА-1 містить чотири рівні керування:

- глобальний рівень G (ММ-4-5 стратегічного організатора групи, де виконується планування та контроль виконання підводної пошукової місії); у дисертаційній роботі на цьому рівні розв'язується задача L_{Gr} згідно (1.2); одночасно рішення стратегічного організатора ММ-4-5, який керує групою АНПА на стратегічному рівні G (множина M_{UM-G}), по каналу «РГАБ – канал морського радіозв'язку» (ММ-3, ММ-2) надходять до поста дистанційного керування підводною пошуковою місією (ММ-1);

- базовий рівень B групового керування АНПА (ММ-4-6), який забезпечує узгоджену роботу групи АНПА при виконанні i -ї підводної місії $M_{UMi} \subset M_{UM}$; у дисертації тут розробляється аналітичне та алгоритмічне забезпечення для організації підводної пошукової місії B_{Gr} згідно (1.2); одночасно рішення групового організатора ММ-4-6, який керує групою АНПА на локальному рівні L (множина M_{UM-L}), по каналу «РГАБ – канал морського радіозв'язку» (ММ-3, ММ-2) надходять до поста дистанційного керування підводною пошуковою місією (ММ-1);

- локальний рівень L автоматичного керування рухом ведучого АНПА-1 як одиночного підводного апарата в умовах навігаційної близькості інших

ведених ним підводних апаратів групи (ММ-4-7); у дисертації тут розв'язується задача L_{Ag} згідно (1.1) як уніфікована задача для кожного окремого АНПА групи;

- виконавчий рівень E (ММ-4-8), де моделюється керований рух АНПА-1 як одиночного підводного апарата, який має підтримувати задані курс і швидкість руху; вихідними сигналами для ММ-4-8 є сигнал керування напругою ГЕД постійного струму u та кут переключення стерна РСК АНПА-1 δ_r (у подальшому в дисертації розглядається плоский рух для всіх АНПА групи).

У якості математичних моделей для АНПА-1 (ММ-4-9...ММ-4-12) прийнято систему рівнянь, описану в п. 2.3.7, оскільки цей підводний апарат як об'єкт керування має такі ж властивості, як і будь-який ведений АНПА.

Математична модель системи гідроакустичного зв'язку ММ-4-13 на основі відомих досліджень [89, 90] описує функціонування систем гідроакустичного зв'язку (Hydroacoustic Communication) між ведучим АНПА-1 та веденими апаратами групи. Результатом роботи вказаної моделі є:

- потоки сигналів керування U_{UM-L} від ММ-4-6, які після проходження через ММ-4-13 приймають значення $\tilde{U}_{Mp2...N}$ і мають забезпечити виконання місії веденими АНПА;

- 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.

По аналогії з (21-22) робота моделі системи гідроакустичного зв'язку веденого АНПА-1 може бути представлена функціями:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_{Mp} &= f_{Mp}(I_{MM-4-13}; \Delta T_{MM-4-13}); \\ \tilde{U}_{Mr} &= f_{Mr}(I_{MM-4-13}; \Delta T_{MM-4-13}, \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

де $I_{MM-4-13}$, $\Delta T_{MM-4-13}$ – пропускна здатність та часова затримка процесів передачі/прийому інформації системи гідроакустичного зв'язку.

Знак «тильда» означає, що інформація отримується споживачами з часовими затримками та з обмеженнями пропускнуої здатності системи гідроакустичного зв'язку.

Математична модель зовнішнього середовища ММ-4-14 містить моделі зовнішніх сил гідродинамічної природи F_{3C} , які у процесі виконання підводної місії діють на зовнішній корпус АНПА-1 та корпуси АНПА-2...N (вплив течії, зміна гідрофізичних параметрів води тощо) [72].

Для оцінки ступеня загроз зіткнень між АНПА-«агентами» групи, до складу узагальненої структури моделюючого комплексу введено:

- модель навігаційної обстановки навколо ведучого АНПА-1 (ММ-4-15), виходом якої є інформація Z_{HO} про дистанцію до сусідніх АНПА групи та про інші загрози безпечному руху цього підводного апарата;

- модель ідентифікатора навігаційних загроз (ММ-4-16), яка генерує інформацію Z_{HZ} про ступінь реальних навігаційних загроз безпечному руху АНПА-1.

Принципи побудови вказаних моделей на основі застосування елементів теорії нечіткої логіки викладено в розділі 3 [91, 92].

2.5 Короткий огляд методів експериментального дослідження систем автоматичного керування АНПА

Основними сучасними методами експериментальних досліджень для групи АНПА і їх САК є комп'ютерне моделювання, басейнові випробування, морські натурні випробування. Існують також стендові (лабораторні) випробування при виконанні початкових попередніх робіт до басейнових і морських натурних випробувань.

На рис. 2.18 показано основні види випробувань АНПА та завдання, які вирішуються в результаті їхнього проведення.

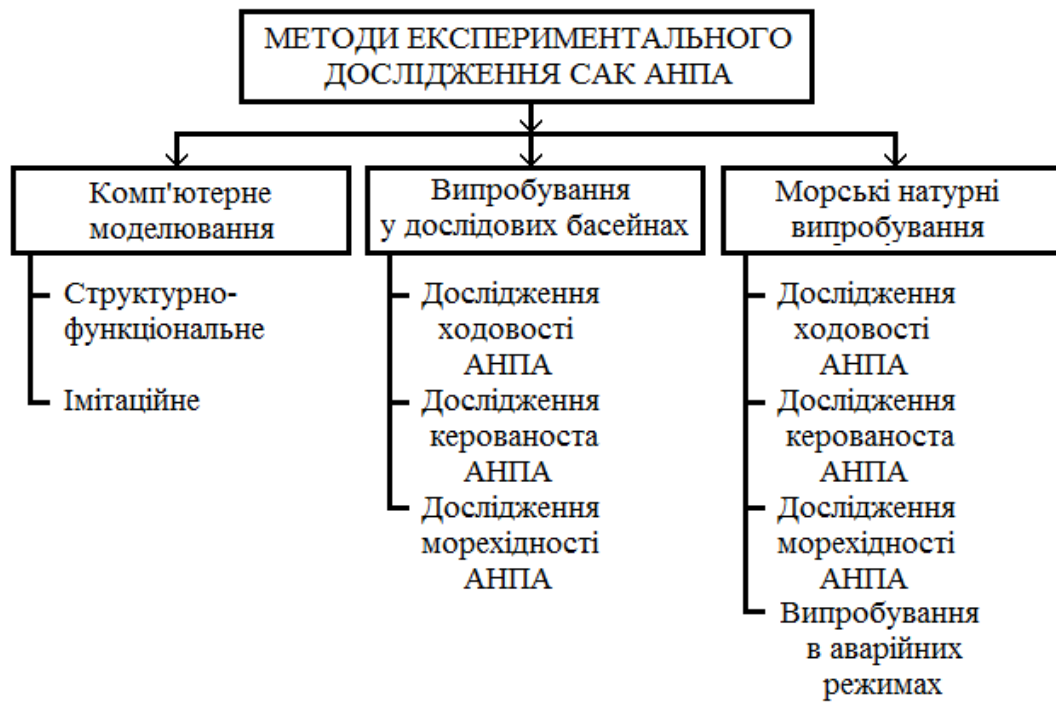


Рисунок 2. 18 - Методи експериментального дослідження САК АНПА

Оскільки експериментальні дослідження є важливою складовою розробки САК окремими АНПА та їх груповим рухом (див. п.р. 2.1), дамо коротку характеристику кожному виду таких випробувань, акцентуючи увагу на особливостях їх підготовки і проведення.

Комп'ютерне моделювання САК АНПА має на увазі складання математичної моделі об'єкта дослідження, її реалізацію на ЕОМ і проведення обчислювального експерименту з її допомогою. У процесі такого експерименту (як правило, виконуваного у вигляді масових комп'ютерних обчислень) вивчаються властивості об'єкта дослідження як об'єкта керування, а також перевіряється ефективність роботи його САК [93].

Розрізняють структурно-функціональне й імітаційне комп'ютерне моделювання. Структурно-функціональне моделювання ґрунтується на використанні схем (блок-схем), графіків, креслень, діаграм, таблиць, малюнків, доповнених спеціальних правил їхнього об'єднання й перетворення з метою одержання необхідних даних [94, 95].

Імітаційне моделювання є найбільш ефективним і універсальним варіантом комп'ютерного моделювання в області дослідження й керування

складними технічними системами. Імітаційне моделювання дозволяє добре враховувати такі фактори, як наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійних характеристик елементів, невизначеності зовнішніх впливів і т.д. [96, 97].

До достоїнств комп'ютерного моделювання варто віднести:

доступність використання пакетів прикладних програм для моделювання;
можливість дослідження САК АНПА в таких режимах роботи, які в реальних умовах неможливі або складно досяжні;

можливість знаходити оптимальні програмно-технічні рішення, не створюючи пробних деталей, вузлів і систем АНПА;

можливість проводити дослідження без ризику для здоров'я людини й для природи.

Басейнові випробування АНПА та їх САК є ефективним інструментом для дослідження ходовості АНПА, керованості й морехідних якостей АНПА [98]. При випробуваннях ходовості АНПА в басейні визначають його якість мати й зберігати задану швидкість ходу за даних умов при мінімальній витраті потужності РСК. Із двох подібних АНПА кращою ходовістю володіє той, котрий розвиває більшу швидкість при однаковій потужності ДРК. При басейнових випробуваннях керованості АНПА досліджується його здатність змінювати напрямок руху під дією РСК.

Випробування морехідності АНПА в басейні проводяться з метою перевірити його працездатність при русі по схвильованій водній поверхні. Для цього басейн повинен бути обладнаний хвилепродуктором. За аналогією з надводними судами [99] до основних морехідних характеристик відносяться схожість на хвилю й заливання корпусу АНПА.

Найбільш складним і, одночасно, найбільш достовірним методом експериментального дослідження САК АНПА є його морські натурні випробування. Такі випробування дають можливість виконати комплексну перевірку ефективності роботи САК АНПА як у надводних, так і в підводних режимах експлуатації.

Однак, підготовка і, власне, організація морських натурних випробувань АНПА вимагає розробки спеціальних програм і методик випробувань, розробки й створення спеціальної вимірювальної й контролюючої апаратури, а також спеціальної підготовки акваторії для безпечного проведення випробувань [100].

Тому у дисертаційній роботі з усього переліку завдань розробки САК групового керування АНПА (див. п.р. 1.5) морські натурні випробування проводились лише для найбільш відповідальної задачі для першого напрямку S_{Ag} автоматизації Co-Co-Ro - технологій – задачі автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА. Програма і методика такого морського натурального експерименту наведена у Додатку В.

Висновки до розділу 2

1. Для одиночного АНПА як «агента» групи підводних апаратів, що виконують спільну місію, структуровано та складено на основі відомих публікацій основні складові його математичної моделі, до складу якої увійшли моделі інформаційної системи та системи автоматичного керування, рушійно-стернового комплексу та зовнішнього корпусу АНПА, а також модель зовнішніх збурень гідродинамічної природи, які діють на зовнішній корпус АНПА.

2. Розроблено математичну модель та структуру автоматичної системи керування рухом одиночного АНПА, що працює у складі групи підводних апаратів. Розроблена система керування складається з двох нечітких регуляторів типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги: регулятора дистанції та регулятора курсу. Отримані результати забезпечують безаварійний рух одиночного АНПА у складі групи.

3. Розроблено узагальнену структуру моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА, що виконують спільну підводну пошукову місію. Комплекс містить чотири

рівні автоматичного керування підводною місією групи АНПА – глобальний, локальний, базовий та виконавчий, які забезпечують моделювання повного циклу підводної пошукової місії, що утворює підґрунтя для реалізації комп'ютерної технології дослідження ефективності синтезованих САК групового керування АНПА.

4. На основі огляду методів експериментального дослідження систем автоматичного керування АНПА обрано морські натурні випробування як форму практичної перевірки працездатності систем автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

Основні матеріали розділу 2 опубліковано в [65, 72, 80, 91, 92].

3 СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОВИМ РУХОМ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ПОШУКОВОГО ТИПУ

3.1 Сучасні групові пошукові підводні місії АНПА та особливості автоматизації їх виконання

На сучасному етапі розвитку підводної робототехніки актуальним є прикладне наукове завдання класифікації методів групового переміщення АНПА з урахуванням їх технічних особливостей, особливостей підводного середовища та властивостей підводних об'єктів. Вирішення цього завдання дозволить створити теоретичну основу синтезу нового типу САК морськими рухомими об'єктами - системою групового керування АНПА.

Зазначимо, що значна кількість сучасних наукових публікацій присвячена питанням групового застосування АНПА [14, 32-35, 37, 38, 58, 101, 102]. Однак наразі не існує єдиної системи класифікації методів застосування групи АНПА як основи для розробки відповідних методів організації керування рухом групи підводних апаратів.

Тому створення класифікації методів групового застосування АНПА для виконання підводних пошукових робіт та пов'язаних з нею підходів до розробки систем групового керування АНПА як основи створення високоефективних систем автоматизації складних підводних робіт, що виконуються на великих за площею акваторіях, є актуальним прикладним науковим завданням.

Виходячи з досвіду успішного групового застосування АНПА провідними морськими державами світу, а також на основі реальних завдань підводного пошуку в інтересах українських організацій, пропонується наступна класифікація підводних завдань і методів їх вирішення за допомогою групи АНПА (табл. 3.1) [103].

Таблиця 3.1. Типові підводні місії та типи організації руху групи АНПА

Типова місія Типовий рух	Пошук затонувлих об'єктів	Картографування донної поверхні	Моніторинг підводного середовища	Обстеження протяжних об'єктів	Наукові дослідження підводного середовища	Воєнне застосування
Централізоване керування						
1. Рух фронтом	+	+	+	+	+	+
2. Рух уступом	+		+		+	+
3. Рух клином	+		+		+	+
4. Радіальний рух (що сходиться та розходиться)	+		+		+	+
5. Рух по колу	+		+	+	+	+
6. Рух по концентричних колах	+		+	+	+	+
7. Рух по спіралі	+		+	+	+	+
8. Просторовий рух	-		+		+	+
Децентралізоване керування						
9. Ройовий рух	+		+		+	+
10. Зграйний рух	+		+		+	+
11. Колективний рух	+		+		+	+

Перші чотири типи організації руху включають синхронізований або несинхронний рух групи з N АНПА на вказаних траєкторіях прямої лінії. У той же час лінійні швидкості АНПА можуть бути однаковими ($v_i=v_l$) або різні ($v_i \neq v_l$).

Наступні чотири типи руху АНПА включають переміщення апаратів по розрахованих криволінійних траєкторіях, які накладають додаткові функції для їх системи керування по поточному розрахунку параметрів руху i -го АНПА як агента мультиагентної пошукової підводної системи.

Ці перші вісім типових типів групового руху реалізуються з використанням принципів центрального контролю, коли параметри переміщення кожного апарату як елемента групи видаються центральним пристроєм керування (наприклад, пост групового керування на ведучому АНПА або на судні забезпечення).

У свою чергу, такий пост отримує інформацію про поточний стан всіх АНПА і зовнішнього середовища.

Розглянемо специфіку організації централізованого керування групою АНПА.

Рух фронтом передбачає лінійне розташування АНПА (пронумеровані кола) з рівними відстанями h між ними в режимі пошуку, рис. 3.1,а [42].

Величина h обирається з урахуванням ширини s робочої зони пошукової апаратури АНПА, але не більше радіуса дії бортових систем зв'язку апаратів r_c :

$$h = \begin{cases} s & \text{при } r_c \geq s \\ r_c & \text{при } r_c < s \end{cases} \quad (3.1)$$

Зазвичай відстань h вибирають з невеликим «перекриттям» ширини s робочої зони пошукового обладнання АНПА для гарантованого вивчення донної поверхні без пропусків.

При виявленні одним із апаратів підводного об'єкта (цілі пошуку), його координати передаються на інші апарати, що призводить до того, що команда АНПА перейде в інший режим роботи (наприклад, переналаштування для обстеження або супроводу рухомого об'єкта).

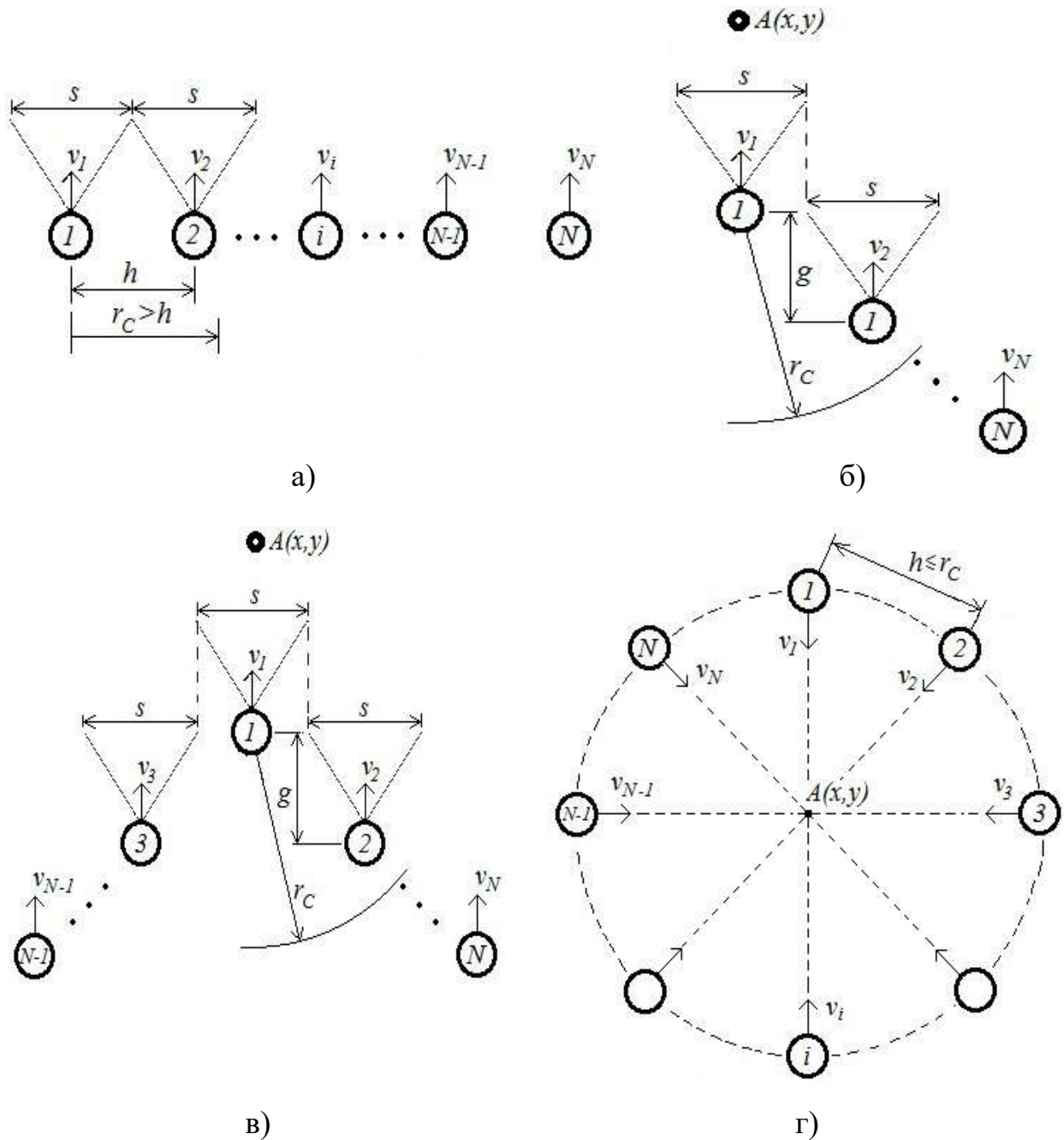


Рисунок 3.1 – Прямолінійні рухи групи АНПА

Рух виступом (рис. 3.1,б) застосовують для пошуку потенційно вибухонебезпечних затонулих об'єктів, коли їх спрацювання на відстані r може пошкодити сусідні АНПА.

Ступінчасте зміщення АНПА g вибирається з урахуванням безпеки, але не більше дальності r_c дій бортових систем зв'язку апаратів:

$$g > \sqrt{p^2 - s^2}/4 \text{ при } g < r_c. \quad (3.2)$$

Рух клином використовується, коли відоме ймовірне розташування об'єкта (цілі пошуку), рис. 3.1,в [42]. В цьому випадку груповий рух побудований так, щоб верхня частина клина спрямовувалася до точки $A(x,y)$ з імовірними координатами цілі, а ступінчасте зміщення АНПА g вибирається на основі діапазону бортових систем зв'язку апаратів r_c або оперативного часу t_0 підходу найближчого АНПА до знайденої цілі:

$$g = \sqrt{r_c^2 - h^2}; \quad (3.3)$$

$$g = \sqrt{(vt_0)^2 - h^2}, \quad (3.4)$$

де: v_i - лінійна швидкість руху i -го АНПА.

Радіальний рух групи АНПА, що сходиться, використовується у випадку виявлення одним із апаратів об'єкта, який треба знайти, з координатами $A(x,y)$ і рішенням про його комплексне обстеження або супровід. На рис. 3.1,г показано приклад початкового розташування групи АНПА, яка раніше переміщалася по колу. Загалом, початкове положення АНПА може бути довільним, однак, вектори їх швидкості після команди до радіального руху, що сходиться, повинна бути спрямована в точку $A(x,y)$.

Радіальний рух групи АНПА, що розходиться застосовується:

для пошуку цілі в робочій круговій зоні з розташуванням судна-носія групи АНПА в центрі;

як перехідний рух для організації інших видів руху.

Груповий рух по колу пропонується автором як проміжна форма руху при формуванні групи АНПА, після чого її переналаштування для виконання конкретної місії (рис. 3.2,а).

Головною метою такого руху являється утримання дистанції h між апаратами не більше r_C .

Рух на концентричних траєкторіях-колах (рис. 3.2,б) пропонується, якщо в одній групі N апарати з різними технічними характеристиками, наприклад, з різними швидкостями руху, з різними показниками автономності роботи. У цих випадках закріплення конкретного АНПА за i -м колом здійснюється з розрахунку максимально повного обстеження робочої зони з одночасним завершенням місії кожного апарату.

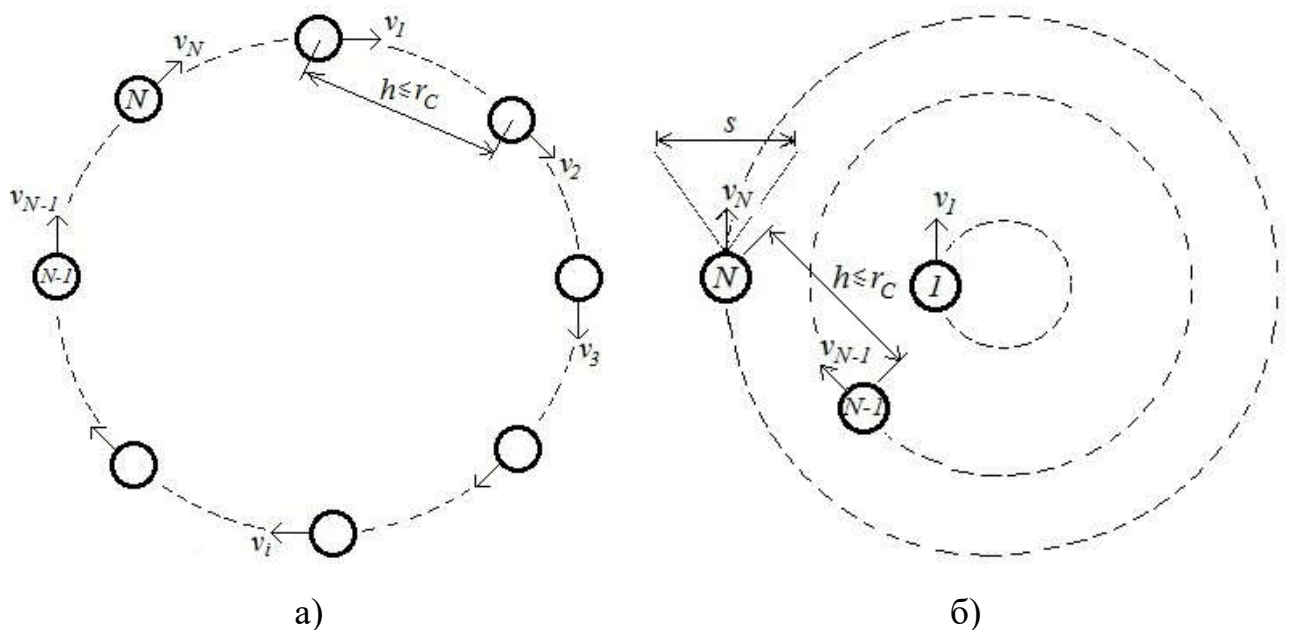


Рисунок 3.2 - Криволінійний рух групи АНПА

У той же час, відстань h між АНПА, що рухаються в суміжних колах, повинна бути не більше, ніж радіус дії бортових систем зв'язку апаратів r_C (3.1).

Розглянемо організацію керування рухом групи їх N апаратів по концентричних траєкторіях на прикладі обстеження кругової робочої зони донної поверхні площею S_{UM} . Якщо відома ширина робочої зони s пошукового обладнання АНПА, то кількість підводних апаратів в групі (за умови, що є тільки один АНПА на кожній круговій траєкторії) може бути визначена з відношення:

$$N = \frac{\sqrt{S_M/\pi}}{s}, \quad (3.5)$$

а радіус r_i i -ї кругової траєкторії для i -го АНПА може бути визначена з виразу:

$$r_i = \frac{s}{2} + (i-1)s. \quad (3.6)$$

Потім, коли пронумеровані всі АНПА в групі по зростанню їх швидкості руху v_i , визначимо загальний час виконання підводної місії T_{UM} з виразу:

$$T_{UM} = \inf \left\{ T_i = \frac{2\pi r_i}{v_i} \right\}_{i=1, \dots, N}, \quad (3.7)$$

де \inf – оператор вибору меншого члена множини $\{T_1, \dots, T_N\}$; v_i - лінійна швидкість i -го АНПА.

Рух групи АНПА по спіралі Архімеда (рис. 3.3) пропонується автором для обстеження кругової робочої зони з максимальною продуктивністю в умовах обмеженої кількості АНПА в групі.

Для керування цим типом групового руху АНПА спочатку необхідно побудувати спіраль Архімеда в полярних координатах $r=k_s\varphi$ з кроком не більше ширини робочої смуги s пошукового обладнання АНПА. Далі приймаємо $k_s=s$.

Площа побудованої спіралі S_A має дорівнювати площі робочої зони – кругової зони пошуку на доній поверхні (центр спіралі має бути в точці $A(x,y)$ з імовірними координатами місцезнаходження цілі):

$$S_A = S_{Ui} = \frac{1}{2} \int_0^{\varphi_M} r^2 d\varphi, \quad (3.8)$$

де r , φ - відповідно, поточні значення радіус-вектора і полярного кута; φ_M - полярний кут спіралі Архімеда з площею S_{UM} .

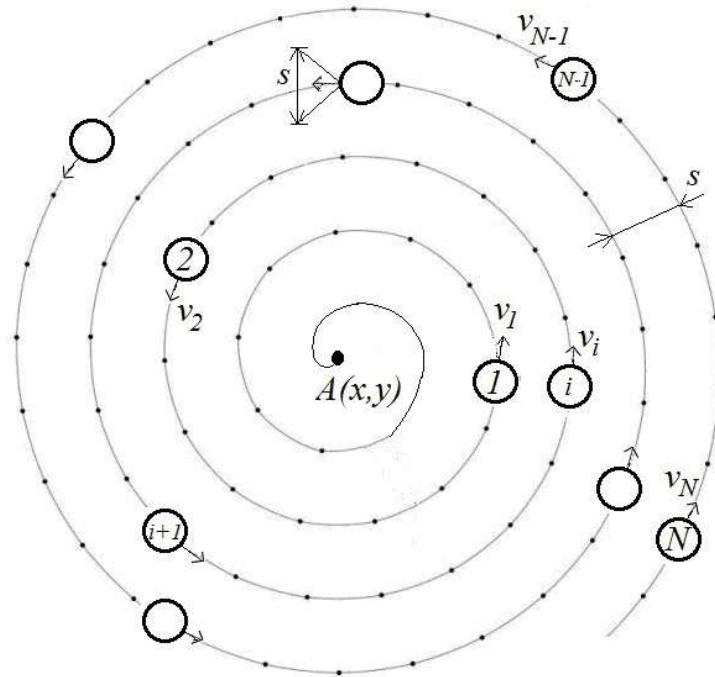


Рисунок 3.3 - Рух групи АНПА по загальній спіралі

Тоді кількість витків спіралі Архімеда w_{UM} при заданій площі $S_A \geq S_{UM}$ знаходимо з відношення:

$$w_{UM} = \frac{R_{UM}}{s} = \sqrt{\frac{S_{UM}}{\pi s^2}}. \quad (3.9)$$

Припускаючи, що $s \ll R_{UM}$ а, отже, зовнішні витки спіралі по формі наближені до кіл, знаходимо полярний кут розрахованої спіралі Архімеда:

$$\varphi = 2\pi w_{UM}; \quad (3.10)$$

Довжину спіралі Архімеда L_{UM} з кроком s , яка буде охоплювати площу кругової робочої зони S_A , знаходимо з відношення:

$$L_{UM} = 0,5s \left[\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right]; \quad (3.11)$$

де $\varphi = 2\pi w$ – полярний кут вирахованої спіралі Архімеда.

При заданій кількості N однотипних підводних апаратів в місії, довжина $l_{АНПА}$ дистанції, яку повинен пройти окремий АНПА в групі, визначається співвідношенням:

$$l_{АНПА} = L/N, \quad (3.12)$$

а при відомій швидкості АНПА v витрати часу T_i окремого АНПА в групі визначається співвідношенням:

$$T_i = l_{АНПА}/v. \quad (3.13)$$

Тоді загальні витрати часу на виконання пошукової місії T_{UM} знаходиться з виразу:

$$T_{UM} = T_i = l_{АНПА}/v. \quad (3.14)$$

Знаючи довжину $l_{АНПА}$ дистанції для i -го АНПА групи та враховуючи залежності $r = s\varphi$, з відношення (3.10) можна обчислити полярні координати $\{r_i, \varphi_i\}$, які є стартовою точкою для i -го підводного апарата групи групи.

Кожний підводний апарат має зайняти свою стартову точку на траєкторії руху, після чого виконується узгоджений рух «агентів» по виділених їм ділянках спіралі.

У результаті такої організації керування всі АНПА групи закінчують обстеження заданої акваторії одночасно.

Таким чином, залежності (1)-(14) дають змогу автоматизувати одне з трьох основних завдань керування групою пошукових АНПА – завдання Z_{PM} планування підводної місії для групи АНПА в умовах обмежень щодо кількості N підводних апаратів в групі та часу виконання підводної місії T_{UM} (другий напрямок C_{Gr} автоматизації Co-Co-Ro – технологій згідно п.р. 1.5).

Вони утворюють аналітичну основу для оцінки необхідної кількості АНПА для операцій підводного пошуку, у тому числі з урахуванням індивідуальних характеристик АНПА по швидкості руху. Ці залежності можуть бути використані при синтезі системи автоматичного керування ведучим АНПА-1.

Крім завдання Z_{PM} , актуальними завданнями автоматизації групового руху АНПА є також наступні завдання:

завдання Z_{GC} синтезу системи автоматичного керування рухом групи АНПА, відібраних для виконання вказаної підводної місії, що забезпечує узгоджені рухи підводних апаратів за призначеними траєкторіями (другий напрямок C_{Gr} автоматизації Co-Co-Ro – технологій згідно п.р. 1.5); результатом розв'язку цього завдання мають бути синтезовані закони та алгоритми керування узгодженим рухом групи АНПА, що забезпечують максимальну продуктивність групи та високу надійність інформаційного обміну шляхом контролю за дистанціями між «агентами» групи;

завданням Z_{AC} синтезу системи автоматичного керування одиночним АНПА як «агентом» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА, результатом вирішення якого мають бути закони та алгоритми автоматичного керування траєкторним рухом АНПА (перший напрямок C_{Ag} автоматизації Co-Co-Ro - технологій згідно п.р. 1.5).

Таким чином, нинішній стан проблеми групового застосування АНПА, як найбільш продуктивної форми проведення підводних пошукових робіт на великих акваторіях, вимагає науково обґрунтованого вирішення комплексного завдання Z_{MAS} автоматизації їх узгодженого групового руху, а множина головних завдань автоматизації містить три основні групи завдань [33]:

$$Z_{MAS} = \{Z_{PM}; Z_{GC}; Z_{AC}\}. \quad (3.15)$$

Нижче наводяться розв'язки вказаних завдань Z_{GC} ; Z_{AC} для найбільш складних варіантів групового руху АНПА

3.2. Автоматизація керування морським безкіпажним комплексом із групою пошукових АНПА

3.2.1 Загальна постановка типового завдання автоматичного керування МБК з групою пошукових АНПА. Групове застосування АНПА є однією з ефективних технологій проведення безлюдних морських пошукових підводних місій, яка гарантує оперативне обстеження великих акваторій з мінімальними витратами часу [104, 105]. За такої технології підводні апарати мають гідроакустичний зв'язок між собою, що забезпечує їх колективну роботу і високу її продуктивність.

Проте перехід групи АНПА на задану віддалену акваторію для виконання ними пошукової місії, зазвичай, вимагає підвищеного ресурсу їх бортових джерел живлення. Це обумовлює необхідність застосування АНПА з високим енергозабезпеченням, що підвищує загальну вартість морських пошукових робіт.

Доставку групи АНПА в район проведення пошукових робіт доцільно виконувати за допомогою безкіпажного надводного судна (БНС, в англomовній літературі - Unmanned Surface Vessel, USV) [106]. Це виключає необхідність кожному АНПА виконувати дальній морський перехід до заданої акваторії пошуку, дасть змогу використовувати АНПА з відносно низьким енергозабезпеченням, яке достатнє для маневрування біля БНС, групового переходу до робочої зони акваторії та виконання власне підводної пошукової місії.

Для виконання морської пошукової місії автором пропонується застосування морського безкіпажного комплексу (МБК, в англomовній літературі - Maritime Unmanned Complex, MUC) у складі БНС та розташованої на його борту групи АНПА [107].

За міжнародною класифікацією вони іменуються мультиагентними підводними системами (Multi-Agent Systems, MAS) й успішно застосовуються у морських екологічних та археологічних дослідженнях [108, 109].

До головних задач створення такого комплексу належить визначення режимів його роботи та розробка узагальненої системи автоматичного керування (САК, в англійській літературі - Control System, CS) комплексом у цих режимах. Зокрема, необхідно забезпечити автоматичний перехід МБК у задану точку акваторії, випуск групи АНПА в море, груповий перехід АНПА до робочої зони акваторії та їхнє розгортання (розосередження) для реалізації обраної ведучим АНПА-1 чи наперед заданої технології підводного пошуку, груповий пошуковий рух АНПА та повернення групи АНПА на борт БНС після виконання пошукової підводної місії.

3.2.2 Розробка базового роботизованого процесу автоматичного виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК. Сучасний досвід створення й застосування засобів морської робототехніки [3, 25, 39] дає змогу визначити наступні основні десять етапів реалізації базової технології виконання морських пошукових підводних місій A_{MUC} на основі застосування МБК з групою пошукових АНПА на борту [107] (рис. 3.4):

1 – автоматичний перехід МБК SC_{MUC1} з порту базування у задану точку морської акваторії, де планується виконання пошукових підводних робіт;

2 – обчислення необхідної кількості АНПА в групі для виконання пошукової місії (див. п.р. 3.2) та автоматичний випуск групи АНПА з борту БНС в море RS_{AUV} в заданій точці морської акваторії;

3 – самоорганізація (автоматичне формування) випущених АНПА в групу F_{MAS1} для колективного переходу до робочої зони, де буде виконуватись пошукова підводна місія;

4 – автоматичний груповий перехід випущених АНПА T_{MAS1} в робочу зону заданої акваторії;

5 – автоматичне зайняття кожним АНПА групи початкової позиції S_{MAS} для узгодженого просторового руху за заданою траєкторією пошуку;

6 – автоматичне виконання групою АНПА пошукової підводної місії за призначенням J_{MAS} ; при цьому АНПА можуть рухатись за однією з типових траєкторій (див. п.р. 3.1);

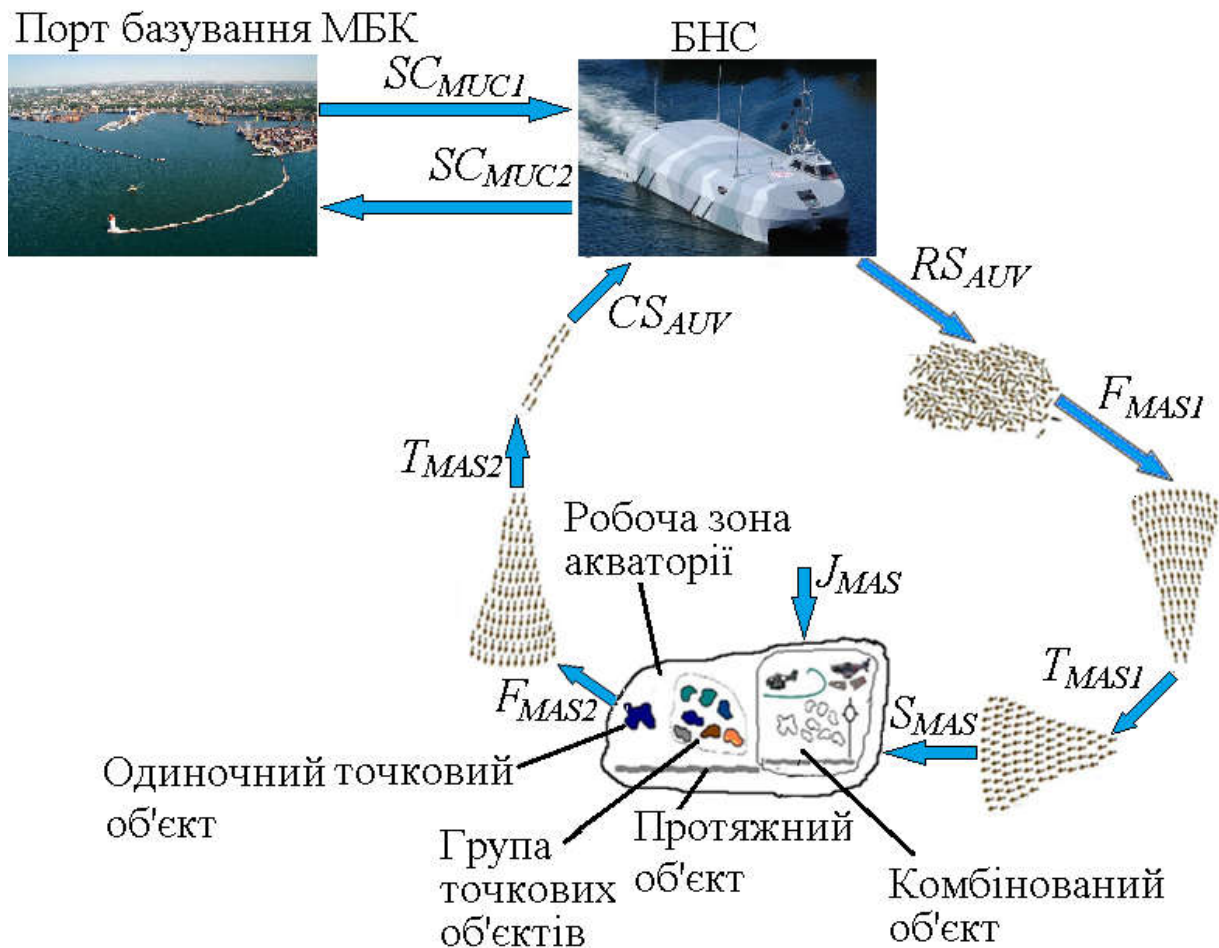


Рисунок 3.4 – Узагальнена схема керування МБК з групою пошукових АНПА

7 – самоорганізація (автоматичне збирання) АНПА в групу F_{MAS2} для повернення до БНС;

8 – автоматичний груповий перехід АНПА до БНС T_{MAS2} ;

9 – автоматичне повернення групи АНПА на борт БНС CS_{AUV} ;

10 – автоматичний перехід МБК SC_{MUC2} до порту базування.

Таким чином, основні етапи реалізації базової роботизованої місії автоматичного виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК A_{MUC} можна представити множиною [110]:

$$A_{MUC} = \{SC_{MUC1}; RS_{AUV}; F_{MAS1}; T_{MAS1}; S_{MAS}; J_{MAS}; F_{MAS2}; T_{MAS2}; CS_{AUV}; SC_{MUC2}\}. \quad (3.16)$$

Розглянемо тепер основні особливості організації керованого руху МБК при проведенні морської пошукової операції.

Перший та десятий етапи ($SC_{MUC1} \in A_{MUC}$; $SC_{MUC2} \in A_{MUC}$) передбачають автоматичний рух БНС з групою АНПА на борту від порту базування до планової точки випуску. Зазвичай, такий перехід відбувається в умовах дії зовнішніх збурень – вітро-хвильових впливів, течії, появи навігаційних перешкод тощо. Тому до головних вимог щодо автоматичного керування рухом БНС належать забезпечення безпечного руху судна заданою траєкторією з розрахунковим значенням швидкості. На цих етапах місії МБК можуть застосовуватись відомі САК, створені для керування БНС [111].

Автоматичний випуск групи АНПА з борту БНС в море у точці з заданими географічними координатами початку пошукової підводної операції (другий етап $RS_{AUV} \in A_{MUC}$) та автоматичне повернення групи АНПА на БНС після завершення підводного пошуку (дев'ятий етап $CS_{AUV} \in A_{MUC}$) є складними науково-технічними задачами. Їх розв'язок можливий за допомогою суднового виконавчого механізму типу «AUV Launch & Recovery System» [112], коли для випускання/повернення чергового АНПА з борту БНС опускається спеціальна підводна касета.

При цьому одночасно БНС має автоматично позиціонуватись у точці випуску АНПА (режим P_{USV}).

Синтез таких механізмів та систем керування ними є окремою прикладною науково-технічною задачею і в цій роботі не розглядається.

Зазначимо, що важливою складовою другого етапу RS_{AUV} є підготовча складова, де визначається необхідна і достатня кількість АНПА в групі N , які треба запустити в море для успішного виконання місії.

Автоматичне формування випущених АНПА в єдину групу (третій етап $F_{MAS1} \in A_{MUC}$) для колективного переходу до робочої зони акваторії, де буде виконуватись підводна місія, утворює окрему прикладну наукову задачу. Особливістю автоматичного керування для цієї задачі є необхідність організації руху випущених АНПА за спеціальними траєкторіями очікування, що дасть змогу побудувати стартову конфігурацію групи.

Такі траєкторії мають забезпечити утримання перших випущених АНПА у складі групи у процесі випуску наступної партії підводних апаратів. Доцільно першим виконувати випуск ведучого АНПА-1, який буде формувати траєкторію очікування.

При формування плоскої (двохвимірної) конфігурації групи АНПА такі траєкторії можуть мати форму спіралі Архімеда, що розходиться, з кроком спіралі $a \leq r_c$, де r_c – радіус дії системи підводного зв'язку АНПА.

При формуванні об'ємної (трьохвимірної) групи АНПА траєкторія очікування може мати форму декількох таких плоских спіралей, розташованих на заданих глибинах.

У першому випадку при застосуванні виконавчого механізму конвеєрного типу суднова САК, яка керує випуском підводних апаратів, має виконувати випуск АНПА з інтервалом часу:

$$\Delta t = \frac{s_{AUV}}{v_{AUV}} \quad (3.17)$$

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.

При застосуванні механізму випуску АНПА касетного типу частина групи підводних апаратів потрапляє у воду одночасно. Тоді формування траєкторії очікування для них може виконувати тимчасовий АНПА-лідер цієї частини групи.

В іншому випадку (формування трьохвимірної групи АНПА) суднова САК має починати формування спіральних траєкторій очікування АНПА з найбільшої заданої глибини і завершувати найменшою заданою глибиною.

При цьому САК кожного випущеного АНПА має забезпечувати його плоский рух по спіралі Архімеда з кроком $a \leq r_c$.

Груповий перехід випущених АНПА в робочу зону заданої акваторії (четвертий етап $T_{MAS1} \in A_{MUC}$) доцільно виконувати одразу після випуску останнього АНПА групи. Початком руху кожного підводного апарата в групі на заданій глибині h_{MAS1} заданим курсом φ_{3MAS1} та з заданою швидкістю v_{MAS1} має бути загальна команда, яка подається з САК БНС чи з АНПА-лідера [113].

Одним з головних завдань автоматизації цього етапу морської пошукової місії є узгоджений рух АНПА без втрат, тобто без зіткнень сусідніх підводних апаратів (надмірне зближення апаратів) та без втрати зв'язку між ними (надмірне віддалення апаратів).

Автоматичне зайняття кожним АНПА початкової позиції (п'ятий етап $S_{MAS} \in A_{MUC}$) для узгодженого просторового руху за заданою траєкторією пошуку виконується у відповідності до плану обстеження заданої акваторії, який заздалегідь складено й уведено до САК кожного АНПА.

При цьому також має забезпечуватись рух без втрат – недопущення зіткнень АНПА та віддалення за межі дії систем підводного зв'язку між сусідніми апаратами.

Автоматичне виконання групою АНПА пошукової підводної місії (шостий етап $J_{MAS} \in A_{MUC}$) виконується шляхом узгодженого руху групи АНПА заданими траєкторіями [42].

Навігаційне забезпечення цього етапу місії може бути організовано за допомогою відомих систем донної навігації, попередньо встановлених на акваторії пошуку (див. п.р. 2.4), або за допомогою навігаційних АНПА, оснащених GPS-приладами для визначення власних географічних координат, та гідроакустичними системами навігаційної підтримки підводних робіт [114].

Важливою складовою автоматичного керування цим етапом місії також є груповий рух АНПА без зіткнень і втрат зв'язку між апаратами.

Автоматичне збирання АНПА в групу після завершення пошукової операції для повернення до БНС (сьомий етап $F_{MAS2} \in A_{MUC}$) виконується за командою АНПА-лідера (АНПА-1). У ході її виконання формується траєкторія очікування по аналогії з третім етапом F_{MAS1} .

Після збору повної групи АНПА за командою АНПА-лідера починається груповий перехід до БНС (восьмий етап $T_{MAS2} \in A_{MUC}$).

Рух кожного підводного апарата в групі на заданій глибині h_{MAS2} заданим курсом φ_{MAS1} та з заданою швидкістю v_{MAS2} має бути без втрат – без зіткнень сусідніх підводних апаратів та без втрати гідроакустичного зв'язку між ними.

Базову безекіпажну технологію виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК представимо у вигляді послідовності виконання (алгоритму) описаних вище етапів, рис. 3.5. На рисунку позначено:

$U1...U10$ – умови виконання етапів множини (3.23) реалізації базової роботизованої місії A_{MUC} автоматичного виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК;

x_1 – плановий хід процесу виконання відповідного етапу місії;

x_2 – планове завершення відповідного етапу місії;

x_3 – позаплановий хід етапу, що вимагає звернення до САК МБК більш високого рівня (перехід В).

Інші позначення на рис. 3.5 відповідають (3.16).

Додатково на рис. 3.5 затемненням показані блоки безекіпажної технології, реалізація яких ґрунтується на авторських дисертаційних дослідженнях. Отриманий алгоритм може слугувати основою для синтезу узагальненої структури САК МБК, що виконує підводну пошукову місію.

Таким чином, задача забезпечення безаварійного автоматичного руху АНПА заданим курсом φ_{MAS1} із заданою швидкістю v_{MAS1} є типовою задачею групового руху будь-якого веденого АНПА.

3.3 Синтез системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи

3.3.1. Аналіз існуючих науково-технічних рішень і постановка задачі синтезу САК. У багатьох морських операціях групове застосування АНПА є більш продуктивним, чим застосування одиночного АНПА

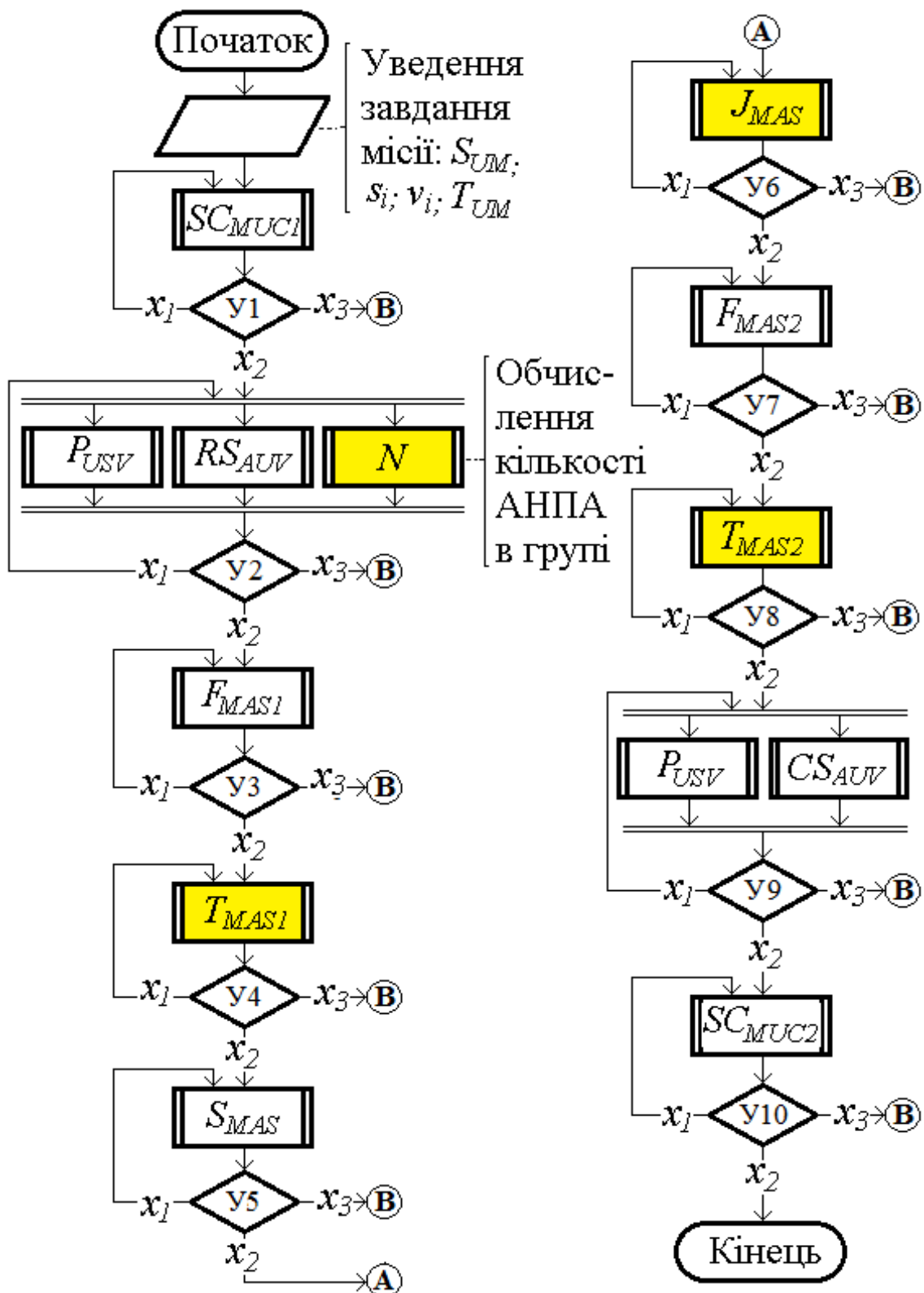


Рисунок 3.5 – Базова безкіпажна технологія виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК

Це пояснюється високою надійністю й швидкістю виконання підводних робіт.

З огляду на вказані переваги, ступінь автономії кожного АНПА в групі повинна бути високою.

Таким чином, у цей час актуальним прикладним науковим завданням автоматизації керування окремим АНПА групи є синтез САК його рухом в умовах групового переходу (ГП). Така система повинна виключати зіткнення або надмірне збільшення відстані між сусідніми АНПА, що може викликати, відповідно, аварійну ситуацію або розпад групи і зрив підводної місії.

У сучасній науковій літературі, проблема навігації АНПА розділена на глобальну навігацію, що пов'язана із плануванням шляху, що приводить апарат у задану точку підводного простору, і локальну навігацію, що є підлеглою стосовно глобальної та забезпечує безаварійний рух окремого АНПА в групі.

Розробка методів автономної роботизованої навігації є одним з основних напрямків підводної робототехніки [35].

Постійний прогрес у технології підводних апаратів і акустичного зв'язку зробив реальним скоординоване керування групою АНПА, яка може складатися з функціонально різних апаратів (різномірних), які можуть розрізнятися по крейсерській швидкості й діапазонам каналів гідроакустичного зв'язку.

Так, в [115, 116] описано систему програмного забезпечення САК для роботизованих платформ (MOOS (Mission Oriented Operating Suite), яка ґрунтується на архітектурі «публікації-підписки» [117]. Така САК була застосована для координації керування групою АНПА для рішення пошукових операцій. У вказаній роботі застосовано методологію «Iv Helm» (інтервальне програмування) для формулювання й розв'язку багатоцільових завдань оптимізації. Ця методологія є основним компонентом для формування модулів MOOS-I, які забезпечують автономність на роботизованих гетерогенних платформах [118].

В [119] також запропоновано модель на основі множинного сенсорного керування для запобігання зіткнень і відстеження заданої траєкторії руху мобільного робота. Ці методи скорочують час і споживання енергії.

Низку наукових робіт присвячено аналізу підходів до побудови САК на базі нечіткої логіки, оскільки цей метод забезпечує високий ступінь стійкості керування й стійкість роботи в умовах перешкод. Так, в [120, 121] було запропоновано моделювання нечітких контролерів з ковзним режимом для АНПА без використання системної моделі й представлені результати експерименту АНПА, використовуючи нечіткий закон керування з ковзним режимом. В [122] автори використовують нечітку логіку й візуальні датчики для уникнення перешкод для колісного робота. Одна з головних переваг цього методу – високий ступінь стабільності й імунітету від зовнішніх збурень. У порівнянні з іншими методами керування нечіткий регулятор має найвищий ступінь свободи в установленні параметрів і використовує просте математичне забезпечення [123].

Крім переваг вказаних вище підходів до побудови систем керування та використаних моделей руху АНПА, вони мають ряд недоліків.

Так, у ході виконання місії не розглядаються питання безаварійного руху окремого АНПА під час групової місії команди АНПА. Під час виконання місії АНПА можуть бути занадто близько один від одного, що може викликати проблеми для групи АНПА.

Крім того, існує ймовірність того, що окремі АНПА будуть переміщатися занадто далеко від заданих робочих зон групи АНПА й тим самим втратять зв'язок один з одним, що несприятливо вплине на продуктивність їхньої підводної місії чи навіть зробить неможливим її виконання.

Тому далі будуть розглянуті зазначені проблеми і виконано синтез нечіткої САК АНПА для узгодженого руху апаратів у груповому переході, що забезпечує безпечну реалізацію місії.

Увага буде приділена інтеграції мультисенсорної інформації від далекомірів для моделювання навігаційної обстановки навколо кожного АНПА.

3.3.2. Розробка узагальненого процесу функціонування САК i -м веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів. Розглядаємо плоский рух веденого АНПА як «агента» групи під час виконання етапів F_{MAS1} та T_{MAS1}

розгортання АНПА в групу та її групового переходу до робочої зони акваторії згідно (3.16) як типових етапів для організації групового руху [124].

Функціонування САК i -м веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів, що виконує підготовчі операції та, власне, груповий перехід, опишемо у вигляді алгоритму, поданому на рис. 3.6.

Дамо опис його роботи у порядку нумерації блоків алгоритму.

Б1 – опитування ведучого АНПА-1 відносно поточного етапу базової роботизованої технології автоматичного виконання пошукових підводних місій; тут також вводяться завдання на ГП, задані з базового рівня керування B :

- значення параметрів руху $M_3 = \{v_3, \varphi_3, h_3\}$, де $v_3 = v_{MAS1}$; $\varphi_3 = \varphi_{MAS1}$; $h_3 = h_{MAS1}$ - відповідно, задані швидкість лінійного руху, курс і глибина занурення АНПА при їх груповому русі;

- значення стартових географічних координат веденого АНПА $\{\Phi_3; \Lambda_3\}$.

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

x_{11} – перехід до блоку Б3 завантаження до пам'яті бортового керуючого контролера веденого АНПА програми виконання поточної пошукової місії J_{MAS} згідно (3.23); тут задіяний канал морського радіозв'язку та РГАБ (див. п.р. 2.4);

x_{12} – перехід до блоку Б4 виконання етапу F_{MAS1} самоорганізації випущених АНПА (автоматичного формування групи) для подальшого колективного переходу до робочої зони, де буде виконуватись пошукова підводна місія; виконання етапу F_{MAS1} передбачає встановлення гідроакустичного зв'язку з сусідніми АНПА, занурення за задану глибину h_3 та розворот веденого апарата на заданий курс курсом φ_3 ;

x_{13} – перехід до блоку Б5 ініціалізації виконання поточного етапу пошукової місії J_{MAS} , де за допомогою бортового керуючого контролера веденого АНПА виконуються підготовчі операції для забезпечення його безаварійного групового руху – перевірка працездатності навігаційних сенсорів АНПА та сенсорів навігаційної обстановки навколо нього.

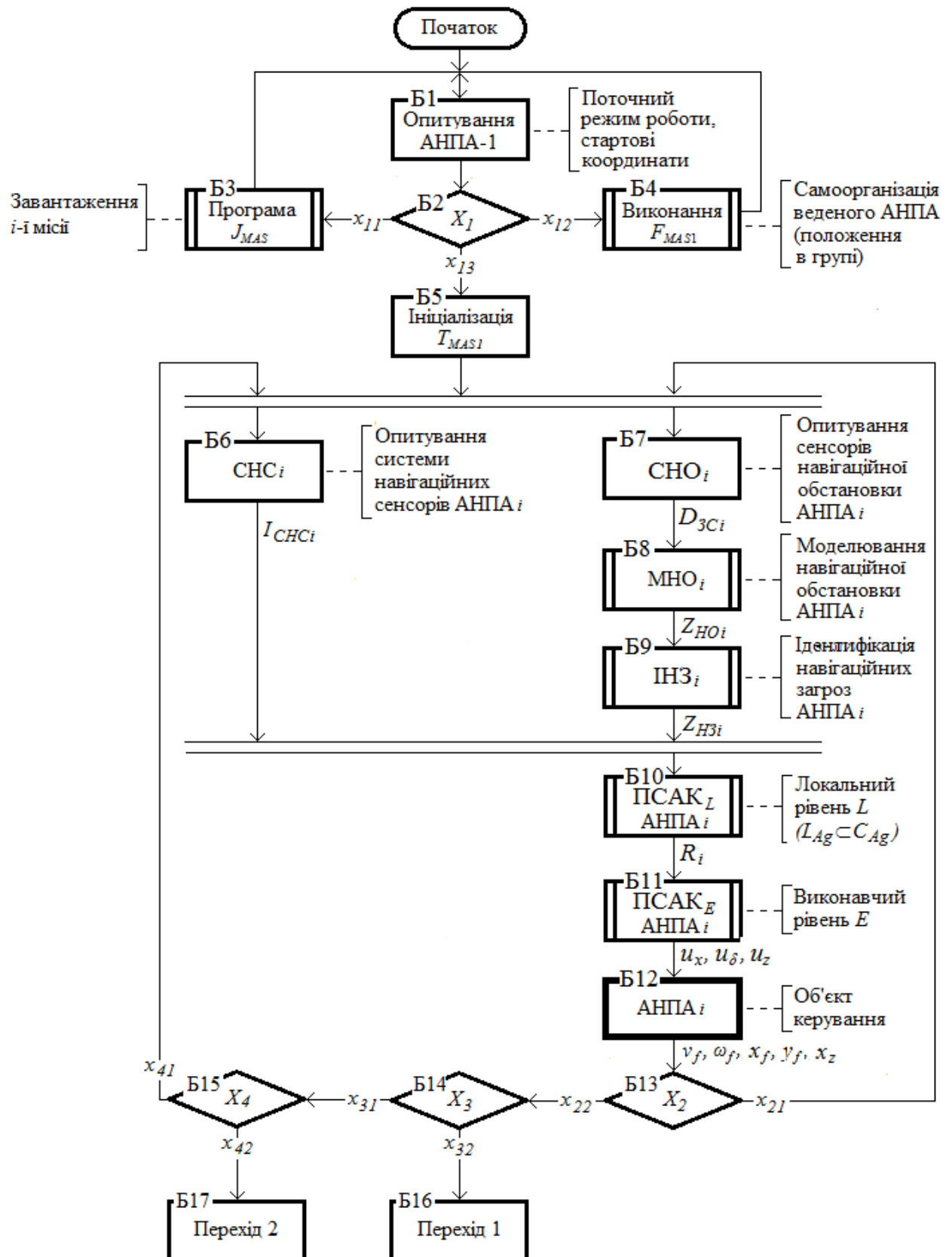


Рисунок 3.6. – Узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування i -м веденим АНПА в режимі групового переходу

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

Б7 – блок 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; зазвичай, це дистанція d_{ij} до j -го АНПА-сусіда та пеленг α_{ij} або курсовий кут KK'_{ij} на цей апарат.

Б8 – блок аналізу та моделювання навігаційної обстановки (МНО) навколо i -го веденого АНПА; тут на основі інформації від Б7 виділяються дистанції та пеленги (курсів кути) до найбільш небезпечних (найближчих) АНПА-сусідів, які створюють навігаційні загрози для i -го веденого АНПА; інформація $Z_{НО}$ про виділених АНПА-сусідів використовується для подальшої оцінки ступеню навігаційної небезпеки для i -го веденого АНПА.

Б9 – блок аналізу та ідентифікації 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; тут також за результатами отриманих оцінок можливих загроз від АНПА-сусідів формуються рекомендації щодо нейтралізації кожної виявленої загрози шляхом маневрування i -го веденого АНПА; зазначена інформація $Z_{НЗ}$ слугує основою для обчислення керуючого впливу на i -й ведений АНПА з урахуванням групових загроз, які діють одночасно.

Б10 – блок має забезпечити локальний рівень 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 (більшої, ніж радіус дії бортових систем зв'язку апаратів r_C); цей рівень забезпечується підсистемою ПСАК $_L$ (множина рекомендацій R_i щодо безпечного руху i -го веденого АНПА).

Б11 – блок має реалізувати виконавчий рівень E автоматичного керування рухом i -го веденого АНПА шляхом підтримання заданих значень курсу і швидкості лінійного руху (підсистема ПСАК $_E$); вихідними сигналами блоку Б11 є сигнали керування частотою обертання ГЕД u_x (керування швидкістю v_{xi}), приводом стерна РСК i -го веденого АНПА $u_{\delta i}$, який змінює кут перекладки стерна δ_{Ri} , а також сигнал u_{zi} керування кутом перекладки стерна вертикального руху АНПА при аварійній зміні глибини занурення..

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}) маневру безпечного розходження з АНПА-сусідом.

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 місії.

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

3.3.3. Розробка структури системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи. Аналіз завдань групового керування АНПА у зазначених етапах виконання морської місії свідчить, що однією з ключових є задача забезпечення безпечного (безаварійного) руху окремого веденого АНПА

у групі на заданій глибині $h_3 = h_{MAS}$ заданим курсом курсом φ_{3MAS1} та з заданою швидкістю $v_3 = v_{MAS}$.

Теоретичною основою автоматизації такого руху A_{MUC} є поняття вирівнювання A_{GU} , адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} [125].

Поняття вирівнювання передбачає утримання стабільними трьох вище зазначених параметрів автоматичного руху групи АНПА:

$$A_{GU} = \{\varphi_{MAS1}; v_{MAS1}; h_{MAS1}\}, \quad (3.18)$$

що вимагає руху групи АНПА у заданому напрямку чи по заданій просторовій траєкторії та автоматичне керування рухом окремого АНПА як агента групи у заданому напрямку із рекомендованою заданою швидкістю та на заданій глибині, однакою для всіх АНПА групи.

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:

$$A_{GA} = \{x_i \geq x_{min}\}_{i=1...W}, \quad (3.19)$$

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 (курсів 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»:

$$A_{GC} = \{x_i \leq x_{max}\}_{i=1...S}, \quad (3.20)$$

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

У якості далекомірів АНПА можуть бути використані підводні гідроакустичні, лазерні чи електричні сенсори, що мають забезпечувати системі автоматичного керування підводного апарата чутливість до сусідніх АНПА, які рухаються у складі групи [126, 127].

Кількість сенсорів і їхні діаграми направленості залежать від низки вимог до групового руху АНПА та від особливостей виконання пошукової підводної місії. Зазвичай кількість сенсорів варіюється у межах від 4 до 12 і забезпечує вимірювання дистанцій між АНПА за відповідними курсовими кутами у межах від 0,1м до 20м, що дає можливість будувати ефективні системи керування груповим рухом засобів підводної робототехніки.

Очевидно, що при виконанні загальної вимоги (3.18) для уникнення зіткнень з сусідніми АНПА i -й ведений підводний апарат має два основні види маневру – маневр курсом і маневр швидкістю руху.

Маневр по глибині будемо вважати аварійним, а його застосування – граничним заходом збереження веденого АНПА в групі.

Для оцінки ступеню загрози зіткнень між агентами групи АНПА пропонується відповідно до п. 3.3.2 до складу САК i -го веденого АНПА ввести спеціальні блоки: блок «Модель навігаційної обстановки» (МНО) навколо відповідного АНПА; блок «Ідентифікатор навігаційних загроз» (ІНЗ) для цього i -го АНПА. Будувати вказані блоки доцільно з залученням теорії нечіткої логіки [82]. Це пов'язано з властивостями i -го веденого АНПА як об'єкту керування, для якого характерним є недостатність та невизначеність інформації, що ускладнює застосування класичних методів синтезу регуляторів.

Розглянемо призначення цих блоків більш детально.

Головне завдання функціонування МНО для i -го веденого АНПА полягає у формуванні для нього поточної підводної навігаційної обстановки – виявлення K найближчих АНПА-сусідів, які утворюють загрозу зіткнення та M найвіддаленіших АНПА-сусідів, які утворюють загрозу втрати контакту з

контрольованих далекомірами W напрямків, а також визначення дистанцій до них.

Призначенням блоку ІНЗ є визначення статичних і динамічних параметрів руху кожного з виявлених АНПА-сусідів за W напрямками, кількісне обчислення рівня загрози зіткнення чи втрати контакту з ним (характеристик адгезії та когезії свого АНПА по відношенню до найближчих АНПА-сусідів) та, одночасно, формування рекомендацій щодо нейтралізації виявленої загрози шляхом маневрування курсом, швидкістю та, у разі крайньої необхідності, глибиною занурення.

Узагальнена структура САК одиночним АНПА як агентом групи наведена на рис. 3.7 (для зручності індекс « i » опущено).

Розглянемо основні принципи функціонування наведеної САК, виходячи з узагальненого алгоритму функціонування САК (п. 3.3.2).

Блок «Сенсори навігаційної обстановки» i -го веденого АНПА (блок Б7 на рис. 3.6) містить набір з W сенсорів групового руху (сенсорів контрольованих напрямків для вимірювання дистанцій до цілей, які виявляються в секторах їх вимірювань).

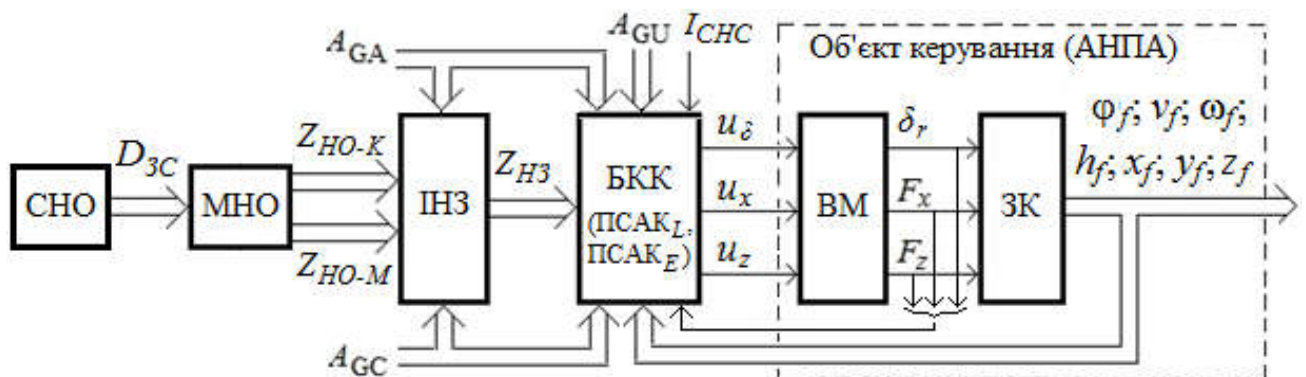


Рисунок 3.7 – Структура САК одиночним АНПА як агентом групи

На виході блоку СНО формуються множини сигналів про дистанції до сусідніх АНПА групи (по наростаючій – від меншого до більшого) $D_{3C} = \{D_{3C1}; \dots; D_{3Cw}; \dots; D_{3Cw}\}$ та пеленги A_{3C} чи курсові кути KK_{3C} на них.

Очевидно, що 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 [128].

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:

$$D_{3Ci} = \begin{bmatrix} d_{11i} & \dots & d_{1ii} & \dots & d_{1Ni} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{w1i} & \dots & d_{wii} & \dots & d_{wNi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{W1i} & \dots & d_{Wii} & \dots & d_{WNi} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Блок «Модель навігаційної обстановки» (блок Б8 на рис. 3.8) 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}) [129].

У блоці МНО виконуються наступні операції:

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});

за допомогою обчислювача похідних (ОП) визначаються динамічні характеристики руху виявлених АНПА-сусідів по груповому руху – лінійні

швидкості руху KK_{HO-Ki} , з якими вони змінюють дистанцію до i -го веденого АНПА та лінійні швидкості руху KK_{HO-Mi} , з якими вони змінюють дистанцію до нього з контрольованих напрямків, що визначаються W сенсорами СНО.

У результаті формується дві множини параметрів, які характеризують навігаційну обстановку навколо i -го веденого АНПА:

$$Z_{HO-Ki} = \{D_{HO-Ki}; A_{HO-Ki}; KK_{HO-Ki}; V_{HO-Ki}\}, \quad (3.22)$$

$$Z_{HO-Mi} = \{D_{HO-Mi}; A_{HO-Mi}; KK_{HO-Mi}; V_{HO-MKi}\}, \quad (3.23)$$

де $K \leq W$ і $K \leq N$.

Для зручності подальшого використання при синтезі САК i -м веденим АНПА отримані множини параметрів доцільно представити 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, оскільки сенсори i -го веденого АНПА закріплені на його ЗК і мають прив'язку до зв'язаної системи координат), а саме:

двома матрицями дистанцій до найближчих АНПА-сусідів D_{HO-Ki} та швидкостей їх зближення чи віддалення V_{HO-Ki} :

$$D_{HO-Ki} = \begin{bmatrix} d_{11i} & \dots & d_{1ki} & \dots & d_{1Ki} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{w1i} & \dots & d_{wki} & \dots & d_{wKi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{W1i} & \dots & d_{Wki} & \dots & d_{WKi} \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

$$V_{HO-Ki} = \begin{bmatrix} v_{11i} & \dots & v_{1ki} & \dots & v_{1Ki} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{w1i} & \dots & v_{wki} & \dots & v_{wKi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{W1i} & \dots & v_{Wki} & \dots & v_{WKi} \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

двома матрицями дистанцій до найвіддаленіших АНПА-сусідів D_{HO-Mi} та швидкостей зміни дистанцій до них V_{HO-Mi} :

$$D_{HO-Mi} = \begin{bmatrix} d_{11i} & \dots & d_{1mi} & \dots & d_{1Mi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{w1i} & \dots & d_{wmi} & \dots & d_{wMi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{W1i} & \dots & d_{Wmi} & \dots & d_{WMi} \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$V_{HO-Mi} = \begin{bmatrix} v_{11i} & \dots & v_{1mi} & \dots & v_{1Mi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{w1i} & \dots & v_{wmi} & \dots & v_{wMi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{W1i} & \dots & v_{Wmi} & \dots & v_{WMi} \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Зазначимо, що інформація D_{HO-Ki} та V_{HO-Ki} необхідна для реалізації, власне, режимів адгезії і когезії, а інформація D_{HO-Mi} і V_{HO-Mi} – для реалізації більш складних алгоритмів групового керування, наприклад, коли i -й ведений АНПА бере на себе функції ведучого АНПА групи.

Таким чином, елементи матриць $D_{HO-Ki} \subset Z_{HOi}$, $D_{HO-Mi} \subset Z_{HOi}$, $V_{HO-Ki} \subset Z_{HOi}$ та $V_{HO-Mi} \subset Z_{HOi}$ містять інформацію про дистанції до K та M навігаційно небезпечних сусідніх АНПА та про швидкості їх зміни за W напрямками (у більшості випадків за курсовими кутами KK_{3C-Ki} та KK_{3C-Mi}) i -го веденого АНПА, які контролюються відповідними його сенсорами CHO_i .

Вказані матриці утворюють інформаційне підґрунтя для кількісної оцінки навігаційних загроз навколо i -го веденого АНПА.

Блок «Ідентифікатор навігаційних загроз» (блок Б9 на рис. 3.6) оцінює ступінь загрози зіткнення з АНПА-сусідами та/чи загрозу втрати гідроакустичного контакту з ними у випадку плоского горизонтального руху згідно залежностей (3.19) та (3.20) 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.

Очевидно, що для організації безпечного руху i -го веденого АНПА у складі групи достатнім є урахування навігаційних загроз лише від одного найближчого i , значить, найбільш небезпечного, АНПА-сусіда з кожного контрольованого напрямку $w \in W$. Це пояснюється тим, що за наявності на w -му контрольованому напрямку декількох АНПА-сусідів найбільшу загрозу зіткнення (чи втрати контакту з групою) несе саме найближчий АНПА-сусід.

Одночасно гідроакустичний зв'язок з ним гарантує i -му веденому АНПА зв'язок з групою у цілому i , значить, його збереження як «агента» у складі групи. При цьому, якщо найбільш віддалений АНПА-сусід з M виявлених підводних апаратів має тенденцію до збільшення дистанції з i -м веденим АНПА з загрозою втрати гідроакустичного зв'язку з ним, це не призведе до «розпорощення» групи, оскільки такий зв'язок будуть підтримувати АНПА, які знаходяться між цими двома апаратами.

Однак, якщо з w -го напрямку АНПА-сусідів, що загрожують зіткненням, не виявлено, актуальною є задача контролю дистанції до найближчого АНПА-сусіда, який віддаляється від i -го веденого АНПА. Це пояснюється загрозою втрати i -м веденим АНПА зв'язку з групою i , як наслідок, його втратою як «агента» групи.

Тому кожному з множин Z_{HO-K_i} і Z_{HO-M_i} у форматі (3.22) і (3.23) необхідно представити двома матрицями-стовбцями навігаційних загроз розміром $[W \times 1]$ кожна, які містять інформацію, відповідно, про дистанції d_{wi} між i -м веденим АНПА та виявленим найближчим АНПА-сусідом за кожним з $w \in W$ контрольованих напрямків, а також про швидкість v_{wi} зміни цих дистанцій до них у процесі руху i -го веденого АНПА у складі групи:

$$D_{H3-K_i} = \begin{bmatrix} d_{1K_i} \\ \dots \\ d_{wK_i} \\ \dots \\ d_{WK_i} \end{bmatrix}; \quad V_{H3-M_i} = \begin{bmatrix} v_{1M_i} \\ \dots \\ v_{wM_i} \\ \dots \\ v_{WM_i} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

$$D_{H3-M_1i} = \begin{bmatrix} d_{1M_1i} \\ \dots \\ d_{wM_1i} \\ \dots \\ d_{WM_1i} \end{bmatrix}; \quad V_{H3-M_1i} = \begin{bmatrix} v_{1M_1i} \\ \dots \\ v_{wM_1i} \\ \dots \\ v_{WM_1i} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

де K_1, M_1 – індекси, які характеризують віднесення змінних, відповідно, до мінімальних і максимальних дистанцій до АНПА-сусідів.

Одночасно у блоці ІНЗ формується множина P_{H3i} рекомендацій щодо нейтралізації кожної окремої (одиначно діючої) w -ї виявленої загрози.

Очевидно, що таку нейтралізацію можливо реалізувати шляхом маневрування курсом φ_i , швидкістю v_i та, у разі крайньої необхідності, зміною глибини занурення h_i i -го веденого АНПА.

Множину рекомендацій P_{H3i} доцільно представити однойменною матрицею розміром $[W \times 3]$, елементи якої містять рекомендовані керуючі реакції i -го веденого АНПА на кожну w -ту виявлену загрозу за наявності припущення, що вона є єдиною поточною загрозою для i -го веденого АНПА у даний момент часу:

$$P_{H3i} = \begin{bmatrix} p_{H3li} \\ \dots \\ p_{H3wi} \\ \dots \\ p_{H3wi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{li} & \Delta v_{li} & \Delta h_{li} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta\varphi_{wi} & \Delta v_{wi} & \Delta h_{wi} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta\varphi_{wi} & \Delta v_{wi} & \Delta h_{wi} \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

де $p_{H3wi} = \{\Delta\varphi_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ – відповідно, рекомендовані курс, лінійна швидкість та глибина руху i -го веденого АНПА для нейтралізації w -ї виявленої загрози.

Таким чином, інформація про кожну окрему ідентифіковану навігаційну загрозу з w -го напрямку ($w \in W$) для i -го веденого АНПА на виході блоку ІНЗ (див. рис. 3.7) може бути представлена такими матрицями:

$$Z_{Hzi} = \{D_{Hz-K1i}; V_{Hz-K1i}; P_{Hzi}\}. \quad (3.31)$$

Отримані матриці можуть бути використані як базові рішення для організації безпечного руху i -го веденого АНПА за умови, коли його СНО виявила лише одного навігаційно небезпечного АНПА-сусіда (матриця P_{Hzi}) та для обчислення маневру i -го веденого АНПА, коли виявлено навігаційно небезпечні АНПА-сусіди одночасно з декількох напрямків.

Бортовий керуючий контролер (БКК) САК i -м веденим АНПА виконує триєдину задачу для локального L та виконавчого E рівнів керування:

- для локального рівня L групового керування підводними апаратами (ПСАК $_{Li}$) – на основі матриць $Z_{Hzi} = \{D_{Hz-Ki}; V_{Hz-Ki}; P_{Hzi}\}$, обчислених згідно залежностей (3.28)-(3.30), формує керуюче рішення R_i для реального маневрування i -го веденого АНПА, щоб уникнути ідентифікованих в ІНЗ одиночної чи групових загроз $w \in W$:

$$R_i = \{\Delta\varphi_i; \Delta v_i; \Delta h_{ij}\}. \quad (3.32)$$

- для виконавчого рівня E групового керування підводними апаратами (ПСАК $_{Ei}$) – формує керуючі впливи $\{u_{\delta_i}; u_{x_i}; u_{z_i}\}$ на ВМ i -го веденого АНПА – відповідно, привод стерна РСК (керована величина – кут перекладки стерна δ_r), маршовий рушійний пристрій (керована величина – кутова частота обертання ГЕД ω_x або упор по поздовжній осі F_x) та, в аварійних випадках, привод горизонтального стерна РСК (керована величина – кут перекладки стерна δ_z) з метою реалізації режимів адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} згідно (3.19) і (3.20);

- для виконавчого рівня E групового керування підводними апаратами (ПСАК $_{Ei}$) – формує керуючі впливи $\{u_{\delta_i}; u_{x_i}; u_{z_i}\}$ на виконавчі механізми (ВМ) i -го веденого АНПА – відповідно, на привод стерна РСК (керована величина – кут перекладки стерна δ_r), маршовий рушійний пристрій (керована величина – кутова частота обертання ГЕД ω_x або упор по поздовжній осі F_x) та вертикальний рушійний пристрій (керована величина – кутова частота

обертання ГЕД ω_z або упор РСК i -го АНПА по вертикальній осі F_z) для реалізації режиму A_{GU} «вирівнювання» i -го веденого АНПА – утримання заданих параметрів руху по (3.18) з використанням інформації I_{CHCi} від блоку Бб (рис. 3.6).

Таким чином, в блоці БКК САК i -м веденим АНПА як «агентом» групи (рис. 3.7) визначаються наступні керуючі впливи:

- на локальному рівні L групового керування (блок Б10 на рис. 3.6) формується рекомендація $R_{i \in L_{Ag}}$ для його безпечного руху у складі групи;
- на виконавчому рівні обчислюються керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{xi}; u_{zi}\}$ для виконання умов (3.18)-(3.20) керованого руху i -го веденого АНПА як «агента» групи – дотримання режимів вирівнювання, адгезії та когезії.

Вищезазначені керуючі впливи, прикладені до ЗК АНПА, обумовлюють появу фактичних змінних просторового руху i -го веденого АНПА – $\{\varphi_f; \nu_f; \omega_f; h_f; x_f; y_f\}$, які у якості зворотного зв'язку використовуються в БКК його САК.

Принципи синтезу основних блоків такої САК розглянемо нижче.

3.3.4. Розробка блоку «Ідентифікатор навігаційних загроз». Вхідними даними для роботи блоку ІНЗ є матриці $D_{HO-Ki} \subset Z_{HOi}$ та $V_{HO-Ki} \subset Z_{HOi}$ згідно (3.24) і (3.26), які містять інформацію про дистанції до K навігаційно небезпечних сусідніх АНПА та про швидкості їх зміни за W напрямками.

Як зазначалось вище, у блоці ІНЗ i -го веденого АНПА виконуються наступні перетворення навігаційної інформації:

- шляхом аналізу матриці D_{HO-Ki} визначається найближчий АНПА-сусід за кожним з W напрямків, який утворює найбільшу загрозу зіткнення з i -м веденим АНПА з цього напрямку:

$$\left. \begin{array}{l} \inf \left\{ d_{1ki} \Big|_{k=1, \dots, K} \right\} = d_{1Ki}; \\ \dots \\ \inf \left\{ d_{wki} \Big|_{k=1, \dots, K} \right\} = d_{wKi}; \\ \dots \\ \inf \left\{ d_{Wki} \Big|_{k=1, \dots, K} \right\} = d_{WKi}. \end{array} \right\} \quad (3.33)$$

- шляхом аналізу матриці D_{HO-Mi} визначається найвіддаленіший АНПА-сусід для i -го веденого АНПА, який утворює загрозу неприпустимо великої відстані від нього і пов'язаної з цим загрози втрати гідроакустичного зв'язку між ними:

$$\left. \begin{array}{l} \sup \left\{ d_{1mi} \Big|_{m=1, \dots, M} \right\} = d_{1Mi}; \\ \dots \\ \sup \left\{ d_{wki} \Big|_{m=1, \dots, M} \right\} = d_{wMi}; \\ \dots \\ \sup \left\{ d_{wki} \Big|_{m=1, \dots, M} \right\} = d_{wMi}. \end{array} \right\} \quad (3.34)$$

Для відібраних дистанцій d_{wki} та d_{wMi} обчислюються перші їх похідні, тобто швидкості зміни дистанцій до них v_{wki} та v_{wMi} .

Таким чином, за допомогою залежностей (3.33) і (3.34) отримуємо пари матриць D_{H3-Ki} , V_{H3-Ki} та D_{H3-Mi} , V_{H3-Mi} згідно (3.28) і (3.29).

Розглянемо тепер особливості обчислення матриці рекомендацій P_{H3i} згідно (3.30).

Розглядаємо випадок, коли блок СНО i -го веденого АНПА виявив лише одного навігаційно небезпечного АНПА-сусіда.

Як було зазначено вище, будувати блок ІНЗ у цілому і обчислення матриці рекомендацій P_{H3i} , зокрема, доцільно проводити із застосуванням теорії нечіткої логіки [82]. При цьому фазифікація вхідних змінних (3.28)-(3.29) для кожної пари $\{d_{wki}; v_{wki}\}$ та $\{d_{wMi}; v_{wMi}\}$ у блоці ІНЗ може бути виконана уведенням наступних лінгвістичних змінних:

для дистанцій d_{wki} та d_{wMi} :

D_B – дистанція велика (є загроза втрати зв'язку з цим АНПА-сусідом);

D_C – дистанція середня;

D_{Opt} – дистанція оптимальна (бажана);

D_M – дистанція мала;

D_H – дистанція небезпечно мала (є загроза зіткнення з АНПА-сусідом);

для швидкостей v_{wKi} та v_{wMi} :

$V_{ЗВ}$ – швидкість зближення велика;

$V_{ЗС}$ – швидкість зближення середня;

$V_{ЗМ}$ – швидкість зближення мала;

V_0 – нульова швидкість зближення (бажана);

$V_{ВМ}$ – швидкість віддалення мала;

$V_{ВС}$ – швидкість віддалення середня;

$V_{ВВ}$ – швидкість віддалення велика.

Функції приналежності дистанцій та швидкостей їх зміни доцільно представити у формі трикутних функцій (trimf), рис. 3.8.

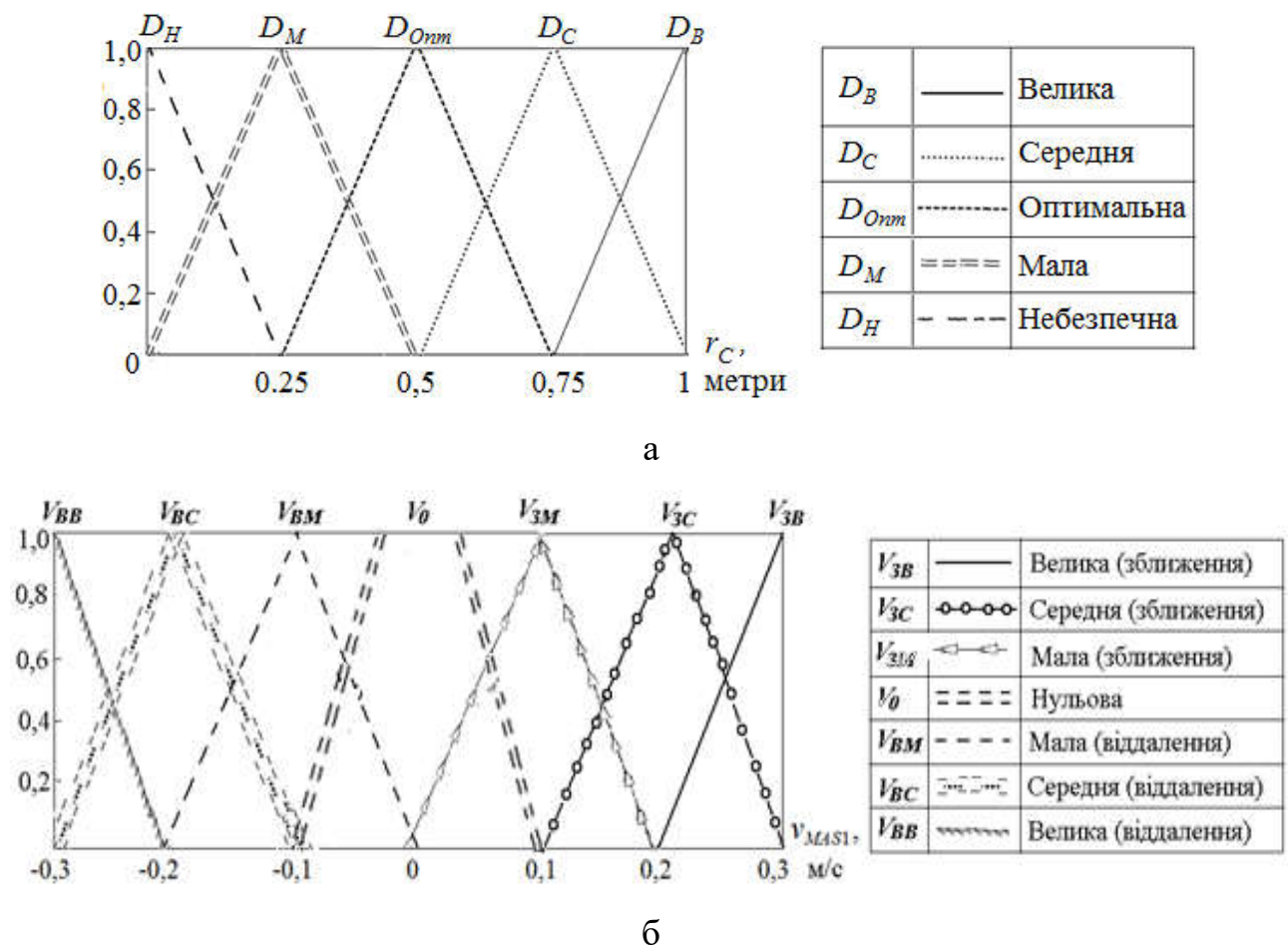


Рисунок 3.8 – Функції приналежності: а – вхідна змінна "дистанція до АНПА-сусіда", метри; б – вхідна змінна "швидкість зближення/віддалення, м/с"

На рис. 3.8 у якості максимальної дистанції між i -м веденим АНПА та АНПА-сусідом попередньо у якості чисельного прикладу прийнято радіус дії бортової системи зв'язку r_C i -го веденого АНПА, а в якості максимальної швидкості зміни дистанції між цими АНПА прийнято третину заданої швидкості групового руху АНПА v_{MAS1} .

Звичайно, у практичних інженерних розрахунках конкретних САК вказані змінні можуть бути іншими і відображати інші конструкційні параметри та експлуатаційні характеристики АНПА групи.

Представимо кожний елемент матриці рекомендацій P_{H3wi} базою правил $БП_{P_{H3}}$, яка містять рекомендовані реакції ВМ i -го веденого АНПА на виявлену одиничну загрозу з w -го напрямку. Зазначені правила мають реалізовувати режими адгезії і когезії згідно (3.19), (3.20).

Попередній досвід синтезу баз правил для реакції ВМ i -го веденого АНПА на загрози з різних контрольованих напрямків свідчить, що при наявності лише однієї виявленої загрози рекомендовані реакції його ВМ мають однакову логіку роботи і, як наслідок, однакову структуру отриманих рекомендацій. Це пов'язано з тим, що незалежно від кута пеленгу на загрозу i -й ведений АНПА має маневром курсу чи швидкості ухилитись від неї, а при неможливості такого маневру – виконати маневр одночасно за курсом і швидкістю або тимчасово змінити глибину занурення.

Завдання синтезу усієї множини таких маневрів належить до проектних робіт при інженерному проектуванні регуляторів.

У якості прикладу розглянемо i -й ведений АНПА, який має чотири сенсори навігаційної обстановки ($W=4$), один – на носу АНПА, другий – на кормі, третій і четвертий – побортно зліва і справа [130] (див. рис. 3.9).

Розглянемо структуру бази правил для випадку, коли сусідній АНПА виявлено правим бортовим сенсором i -го веденого АНПА, що контролює загрози по поперечній осі у зв'язаній системі координат АНПА (матриця рекомендацій P_{H3wi-Y} , база правил $БП_{P_{H3-Y}}$).

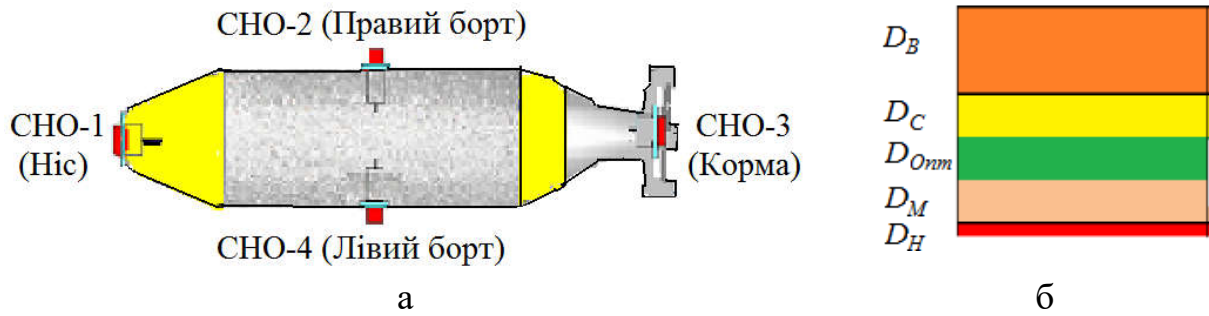


Рисунок 3.9 – Розташування сенсорів навігаційного зв'язку на ЗК i -го веденого АНПА (а) та градація дистанцій до АНПА-сусідів

Для зручності запису складові кожного елемента $p_{H3wi} = \{\Delta\theta_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ матриці P_{H3wi} запишемо у вигляді стовбця (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 База правил BP_{PH3-Y} блоку ІНЗ (правий бортовий сенсор)

		Швидкість зближення/віддалення V_{H3}						
		V_{3B}	V_{3C}	V_{3M}	V_0	V_{BM}	V_{BC}	V_{BB}
Дистанція D_{H3}	D_B	0	0	0	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiM\epsilon}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_C	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	$\Delta\theta_{wiMm}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiM\epsilon}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_{Omm}	$\Delta\theta_{wiB\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	$\Delta\theta_{wiMm}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\epsilon}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_M	$\Delta\theta_{wiB\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiB\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_H	0	0	$\Delta\theta_{wiB\epsilon}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
		Δh_{wi}	Δh_{wi}	0	0	0	0	0

У табл. 3.2 позначено:

$\Delta\theta_{wiM(m,c,e)}$ – рекомендації щодо кута δ_r перекладки стерна РСК i -го веденого АНПА для зменшення дистанції до виявленої одиничної загрози з w -го напрямку (режим когезії); відповідно, m – малий кут перекладки, c – середній кут перекладки, e – великий кут перекладки;

$\Delta\theta_{wiB(m,c,e)}$ – рекомендації щодо кута δ_r перекладки стерна РСК i -го веденого АНПА для збільшення дистанції до виявленої одиничної загрози з w -го напрямку (режим адгезії); значення індексів аналогічні вище описаним);

Δh_{wi} – рекомендація по зміні глибини занурення i -го веденого АНПА; тут і далі вважаємо, що такий маневр носить тимчасовий характер і після деякого визначеного часу цей АНПА повертається на задану глибину $h_3 = h_{MAS1}$ та поновлює аналіз навігаційної обстановки.

Аналогічну форму мають бази правил для маневрування швидкістю Δv_{wi} при виявленні одиничної загрози по осі x зв'язаної системи координат.

При цьому у табл. 3.2 замість рекомендації $\Delta\theta_{wi}$ щодо зміни кута перекладки стерна РСК має бути рекомендація Δv_{wi} зміни швидкості лінійного руху i -го веденого АНПА.

Дефазифікацію змінної $\Delta\theta_{wi}$ (рекомендацій щодо нейтралізації окремої w -ї виявленої загрози) запишемо у вигляді функції приналежності $\theta_{wi}=f(\Delta\theta_{wi})$, представленій на рис. 3.10.

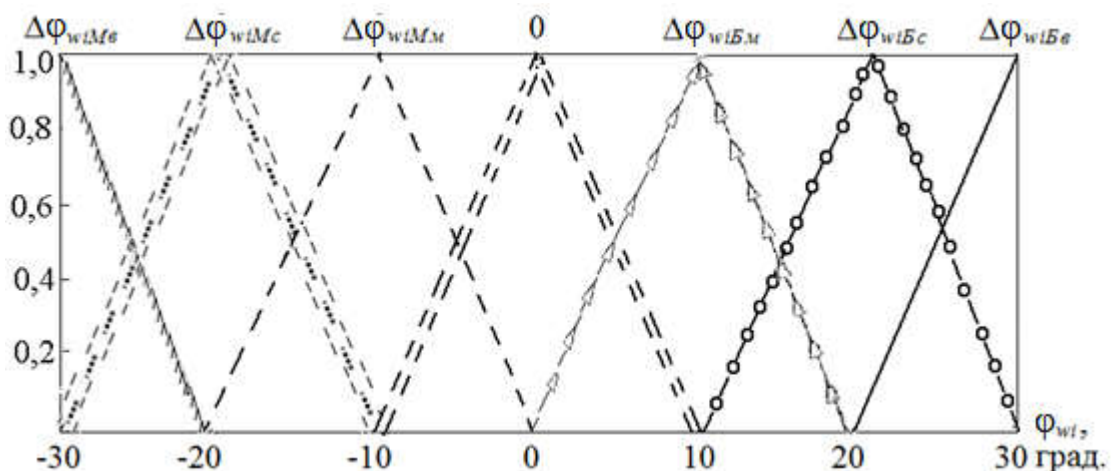


Рисунок 3.10 – Функція приналежності: вихідна змінна – кут перекладки стерна θ_{wi}

У результаті на виході блоку ІНЗ одночасно з матрицями $D_{H3-K}; i$ V_{H3-Ki} формується матриця P_{H3i} виду (3.30), яка містить рекомендації щодо маневрів i -го веденого АНПА для ухилення від одиночних навігаційних загроз за W контрольованими напрямками.

Тим самим реалізуються заходи L_{Ag} локального рівня автоматизації L напрямку автоматизації C_{Ag} щодо забезпечення навігаційної безпеки просторового руху i -го веденого АНПА у складі групи згідно п.р. 1.5.

Реалізація множини рекомендацій покладена на бортовий керуючий контролер (БКК) САК i -м веденим АНПА (рис. 3.7).

3.3.5. Розробка блоку «Бортовий керуючий контролер». Згідно з призначенням (див. п. 3.3.3) блок БКК розв'язує три основні задачі:

- Задача-1: 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 групового керування, підсистема ПСАК $_L$);

- Задача-2: 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 $_E$);

- Задача-3: 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 $_E$).

Структура блоку БКК, що забезпечує виконання вказаних функцій, наведена на рис. 3.11.

Розглянемо призначення модулів блоку БКК.

Модуль «Аналіз рівня загроз» (АРЗ) визначає кількість контрольованих напрямків, за якими одночасно існують навігаційні загрози для i -го веденого АНПА від найближчих АНПА-сусідів.

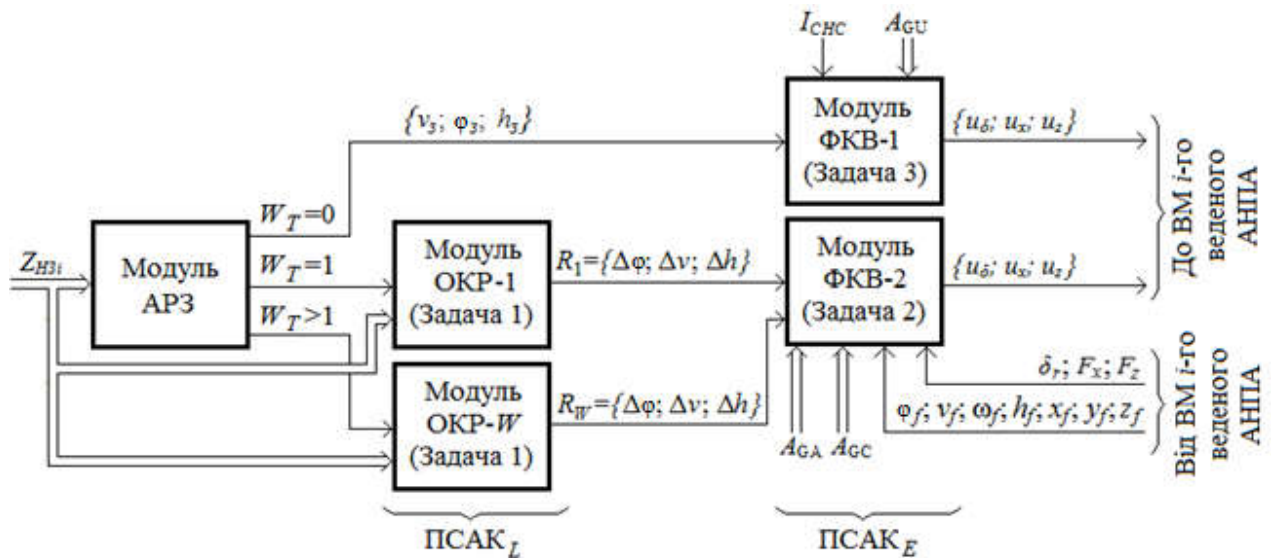


Рисунок 3.11 – Структура блоку «Бортовий керуючий контролер»

Тут на основі аналізу матриці $D_{H3-K1i} \subset Z_{H3i}$ (3.28) шляхом сортування [131] обчислюється кількість її ненульових елементів $W_{T \leq W}$ за виразом:

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

Якщо $W_T=0$, це означає, що навігаційних загроз i -го веденого АНПА не виявлено і його САК виконує Задачу-3 «вирівнювання» згідно (3.18), тобто формує вимоги до VM АНПА на утримання стабільними трьох параметрів автоматичного групового руху: $v_3 = v_{MAS1}$; $\theta_3 = \theta_{MAS1}$; $h_3 = h_{MAS1}$. У цьому випадку керування i -м веденим АНПА виконується згідно п. 2.3.7, а керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{xi}; u_{zi}\}$ для VM i -го веденого АНПА обчислюються у модулі «Формування керуючих впливів-1» (ФКВ-1), де розв'язується задача-3 формування керуючих впливів для реалізації режиму A_{GU} «вирівнювання» i -го веденого АНПА (див. рис. 3.11). На цьому рисунку індекси i при вихідних змінних модулів опущено для зручності сприйняття інформації.

Таким чином, модуль ФКВ-1 реалізує одне із завдань виконавчого рівня E групового керування (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$ на рис. 3.6, блок Б11).

Якщо $W_T=1$, це означає, що виявлено одну-єдину навігаційну загрозу, а її нейтралізацію слід виконувати, скориставшись рекомендаціями матриці P_{Hzi} (3.30). Для цього до структури БКК введено модуль «Обчислення керуючих рішень» (ОКР-1), де з використанням матриці рекомендацій $P_{Hzi} \subset Z_{Hzi}$ визначається керуюче рішення $R_1 = \{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_{ij}\}$ для конкретної навігаційної ситуації з одним АНПА-сусідом. Керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{xi}; u_{zi}\}$ для ВМ i -го веденого АНПА обчислюються у модулі «Формування керуючих впливів-2» (ФКВ-2), де розв'язується задача-2 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 $_E$ на рис. 3.6, блок Б11).

Найбільш складним є випадок, коли $W_T > 1$. Це означає, що керуюче рішення $R_i = \{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_{ij}\}$ згідно (3.32) треба шукати для кожної комбінації загроз окремо. Для обчислення таких рішень до складу блоку БКК уведено модуль «Обчислення керуючих рішень» (ОКР- W), змістовна частина якого визначається кількістю $СНО_i$ (кількістю контрольованих напрямків W) i -го веденого АНПА.

Керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{xi}; u_{zi}\}$ для ВМ i -го веденого АНПА при цьому також обчислюються у модулі ФКВ-2 (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$ на рис. 3.6, блок Б11).

Так, при $W=4$ (див. рис. 3.9) кількість комбінацій можливих навігаційних загроз дорівнює 11 і визначається кількістю парних, потрійних та однієї зчетвереної комбінації загроз, які виявляються сенсорами $СНО_i$. Якщо носовий, правий, лівий і кормовий сенсори для i -го веденого АНПА позначити, відповідно, як $СНО_N$, $СНО_P$, $СНО_L$ і $СНО_K$, отримаємо наступні комбінації напрямків можливих навігаційних загроз:

- дві одночасно виявлені загрози – $(\text{СНО}_H + \text{СНО}_П); (\text{СНО}_H + \text{СНО}_Л);$
 $(\text{СНО}_H + \text{СНО}_К); (\text{СНО}_К + \text{СНО}_П); (\text{СНО}_К + \text{СНО}_Л); (\text{СНО}_П + \text{СНО}_Л);$
- три одночасно виявлені загрози + $(\text{СНО}_H + \text{СНО}_П + \text{СНО}_Л); (\text{СНО}_К +$
 $\text{СНО}_П + \text{СНО}_Л); (\text{СНО}_H + \text{СНО}_П + \text{СНО}_К); (\text{СНО}_H + \text{СНО}_Л + \text{СНО}_К);$
- чотири одночасно виявлені загрози – $(\text{СНО}_H + \text{СНО}_П + \text{СНО}_Л + \text{СНО}_К).$

Далі у розділі будемо розглядати i -й ведений АНПА з $W=4$.

Очевидно, що для кожної з наведених можливих комбінацій навігаційних загроз, які визначені матрицею D_{H3-K1i} (при $W_T > 1$), необхідно виконати синтез нечіткого регулятора, аналогічного описаному в п.3.3.4.

Розглянемо особливості синтезу такого регулятора для кожного типу комбінації загроз.

При наявності двох одночасно виявлених загроз типу $(\text{СНО}_H + \text{СНО}_П)$, які діють за різними осями зв'язаної системи координат, припустимим є одночасне застосування двох рекомендацій типу (3.30), оскільки вони викликають маневри за різними напрямками руху i -го веденого АНПА.

При виявленні двох загроз, які діють по однаковим осям (наприклад, загрози $(\text{СНО}_П + \text{СНО}_Л)$ діють по поперечній осі y), блок ОКР визначає найближчу по дистанції до загрозу i -го веденого АНПА і реалізує керування згідно до рекомендацій (3.30). Якщо дистанції до цих загроз однакові, виконується маневр швидкістю ($\Delta v_{wi} \neq 0$) або глибиною занурення ($\Delta h_{wi} \neq 0$).

Очевидно, що таке керуюче рішення забезпечує i -му веденому АНПА постійне знаходження у складі групи завдяки наявності постійного гідроакустичного контакту з найближчим АНПА-сусідом i , таким чином, є обґрунтованим.

При наявності одночасно трьох загроз, які наближаються (гірший варіант сценарію підводного руху) модуль ОКР- W має визначити дві найбільші загрози на зіткнення, а потім обчислити керуючі впливи згідно попереднього сценарію з двома загрозами. При цьому припустимим є горизонтальний маневр з метою ухилення від діючих загроз за напрямком w , з якого загроза відсутня.

При наявності одночасно чотирьох загроз, які наближаються до i -го веденого АНПА (найбільш небезпечний варіант сценарію підводного руху) модуль ОКР- W має визначити дві найбільші загрози на зіткнення, а потім обчислити керуючі впливи на ухилення згідно попереднього сценарію з двома загрозами.

При цьому, оскільки маневр ухилення від найближчого АНПА-сусіда обмежений з-за наявності загрози з кожного контрольованого напрямку, найбільш безпечним є аварійна зміна глибини занурення i -го веденого АНПА.

Синтез нечітких регуляторів для кожного з описаних варіантів навігаційної обстановки є тривіальною інженерною задачею і тут не розглядається.

Висновки по розділу 3

1. Запропоновано класифікацію методів групового застосування АНПА в інтересах вивчення й освоєння Світового океану, що охоплює плоский прямолінійний і криволінійний рух підводних апаратів, а також їх груповий просторовий рух. Сформульовано множину прикладних науково-технічних завдань по створенню систем централізованого й децентралізованого керування групою підводних апаратів, що виконують спільну місію. Отримано аналітичні залежності для оцінки необхідної кількості АНПА в групі для пошукової морської операції при наявності та відсутності обмежень технічного характеру.

2. Сформульовано актуальні завдання автоматизації групового руху АНПА – завдання синтезу системи автоматичного керування рухом групи АНПА, відібраних для виконання вказаної підводної місії, що забезпечує узгоджені рухи підводних апаратів за призначеними траєкторіями та завдання синтезу системи автоматичного керування одиночним АНПА як «агентом» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

3. Для підвищення продуктивності підводних пошукових операцій на віддалених морських акваторіях запропоновано використовувати безекіпажний

морський комплекс у складі безекіпажного надводного судна з групою автономних ненаселених підводних апаратів на борту. Показано актуальність прикладного наукового завдання автоматизації керування таким комплексом, а також необхідність удосконалення системи автоматичного керування окремим АНПА як агентом групи, який працює в умовах невизначеності. Удосконалено процес керування морською підводною пошуковою місією за допомогою такого комплексу у складі десяти етапів, які охоплюють операції автоматичного переходу безекіпажного надводного судна у задану акваторію, автоматичний випуск групи АНПА та їх узгоджений рух у район пошуку, виконання пошукових операцій та повернення на безекіпажне надводне судно, а також автоматичне повернення цього судна на базу.

4. Вперше розроблено узагальнений алгоритм функціонування САК *i*-м веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів, що виконують спільну місію, та виконано синтез системи автоматичного керування таким АНПА, яка реалізує основні режими групового руху – вирівнювання, адгезію та когезію. На основі залучення теорії нечіткої логіки синтезовано основні складові системи автоматичного керування – блоки сенсорів навігаційної обстановки, моделювання навігаційної обстановки, ідентифікації навігаційних загроз та бортового керуючого контролера. У якості типового прикладу застосування нечіткої логіки наведено синтез ідентифікатора навігаційних загроз, який генерує рекомендації щодо маневрів *i*-го веденого АНПА для ухилення від одиночних навігаційних загроз за напрямками, контрольованими сенсорами АНПА.

Основні матеріали розділу 3 опубліковано в [103, 104, 107, 110, 124, 129, 130].

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЯК «АГЕНТОМ» ГРУПИ

4.1 Короткий опис організації морського натурального експерименту

4.1.1. Особливості проведення морського натурального експерименту. Постановка завдання морських натурних експериментів та обробка їх результатів, зазвичай, є складними в реалізації, тому розробляються відповідні програми й методики, які дають змогу проводити дослідження в натурних умовах.

Розглянемо можливі варіанти організації такого експерименту.

Організація й проведення морського натурального експерименту щодо перевірки працездатності САК АНПА вимагає виконання попередньої підготовчої роботи, а саме:

- вибору акваторії достатнього розміру, щоб система керування рухом АНПА мала можливість функціонувати без будь-яких обмежень;
- проведення низки організаційних заходів щодо забезпечення захисту акваторії від руху суден та інших плавзасобів, виключення на її території видів людської діяльності, які можуть обмежити проведення експерименту;
- розробки приладового та метрологічного забезпечення для виміру характеристик параметрів руху групи АНПА; для цього необхідно виконати розмітку морського полігону, на дні обраної акваторії виконати низку підготовчих робіт щодо навігаційного забезпечення групового руху АНПА.

Досвід Науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова минулих десятиліть, отриманий у результаті виконання низки міжнародних і вітчизняних контрактів по створенню і передачі замовникам нових засобів підводної робототехніки [26, 100], свідчить про необхідність виділення та спеціальної підготовки акваторії для проведення експерименту як одну з головних умов, що мають забезпечити

його успішне проведення. Зокрема, для реалізації завдань дисертаційного дослідження необхідно виділити акваторію з розмірами не менше з розмірами не менше 100м x 100м, глибиною не менше 10м та рівною донною поверхнею. На донній поверхні необхідно встановити гідроакустичні маяки, які будуть фіксувати рух досліджуваних АНПА і, таким чином, утворювати інформаційну основу для цифрового документування процесу і результатів випробувань (рис. 4.1).

Це найбільш повний варіант проведення морського натурного експерименту для дисертаційного завдання, проте для його реалізації необхідно використовувати велику кількість гідроакустичного обладнання високої вартості, що на даний час виявилось складно реалізувати через фінансові обмеження.

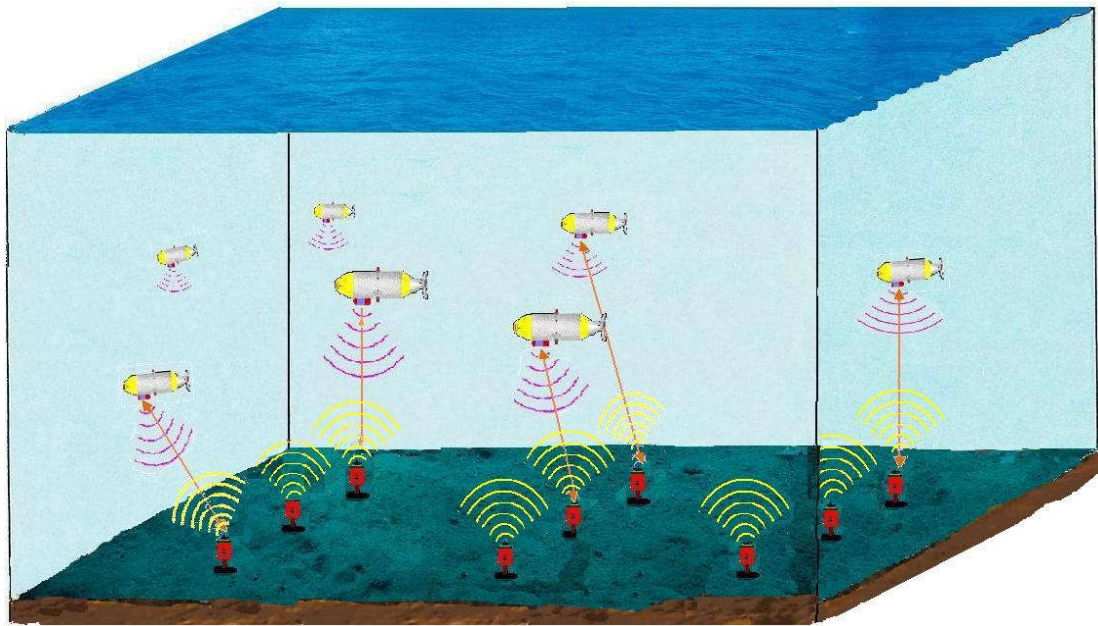


Рисунок 4.1 – Загальна схема проведення морського натурного експерименту

Тому нижче наведено короткий опис розробленої автором «Програми і методики проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи» [136], яку можливо реалізувати на практиці в умовах фінансових обмежень (див. Додаток В).

4.1.2. Загальна схема випробування та характеристики залученого обладнання. Натурне випробування САК АНПА було виконане для перевірки її працездатності при реалізації основних режимів когезії й адгезії. Оскільки застосування гідроакустичних сенсорів виявилось неможливим з-за фінансових обмежень, до експерименту залучено два імітатора АНПА, сенсорний контакт між якими реалізовано за допомогою акустичних приладів.

Схема натурального випробування узгодженого руху двох АНПА наведена на рис. 4.2.

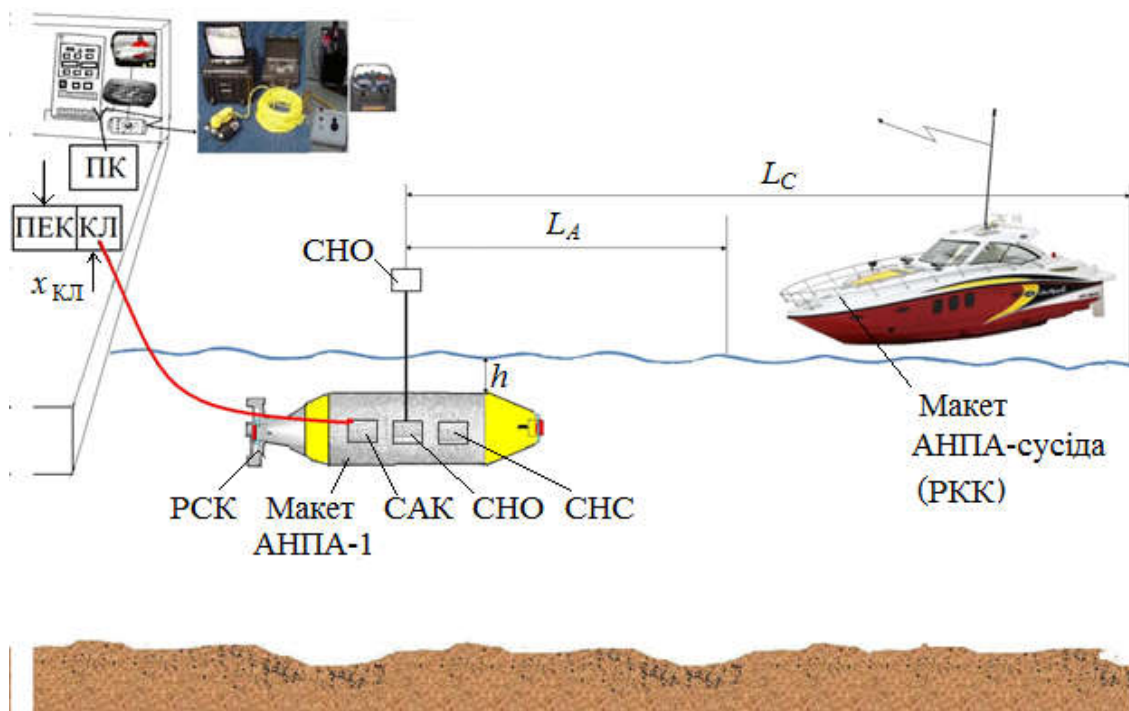


Рисунок 4.2 – Схема натурального випробування узгодженого руху двох АНПА

При виконанні натурних випробувань у якості дослідного АНПА-1 використано телекерований ненаселений підводний апарат, керований програмним забезпеченням з поста енергетики й керування (ПЕК). Дане рішення дозволяє зберігати та аналізувати експериментальні дані в режимі реального часу. Зв'язок АНПА-1 з ПЕК здійснюється за допомогою кабелю зв'язку.

Наявність кабелю може істотно впливати на якість процесів керування, тому контроль його мінімальної довжини автоматизовано.

АНПА-1 приводиться в рух власним РСК, сигнали керування яким виробляються у САК АНПА-1 – САК рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА (див. п. 2.4.2).

Наведена система у якості сенсорів зворотного зв'язку використовує систему сенсорів навігаційної обстановки (СНО) та штатну систему навігаційних сенсорів (СНС) підводного апарата АНПА-1 (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд СНО та її розташування на АНПА-1

У якості сенсорів СНО використано ультразвукові далекоміри моделі MB 1003-EZ0 виробництва фірми MaxBotix [137].

У якості АНПА-2 (АНПА-сусіда) використано надводний радіокерований катер (РКК), керований оператором вручну з пульта керування (ПК) [138]. Катер оснащений додатковими відбивачами ультразвукових акустичних сигналів і забезпечує режими прямолінійного руху й плоскої циркуляції, що є достатнім для проведення натурних випробувань САК АНПА-1.

Морські натурні випробування САК АНПА було проведено на базі морської лабораторії "Дельта" науково-дослідної частини Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. У ході випробувань проведено експериментальну перевірку роботи регулятора дистанції при роботі АНПА-1 в режимах когезії й адгезії, при відхиленні апарата від заданого курсу під дією зовнішнього збурення, а також під впливом сигналу на його РСК, який змінюється за гармонічним законом.

4.1.3. Короткий опис змісту морського натурального експерименту. Натурні випробування складаються із серії експериментів, кожен з яких дає змогу перевірити працездатність певного режиму роботи САК моделі АНПА-1 в умовах навігаційної близькості моделі АНПА-сусіда.

Блок-схема узагальненого алгоритму проведення морського натурального експерименту зображена на рис. 4.4.

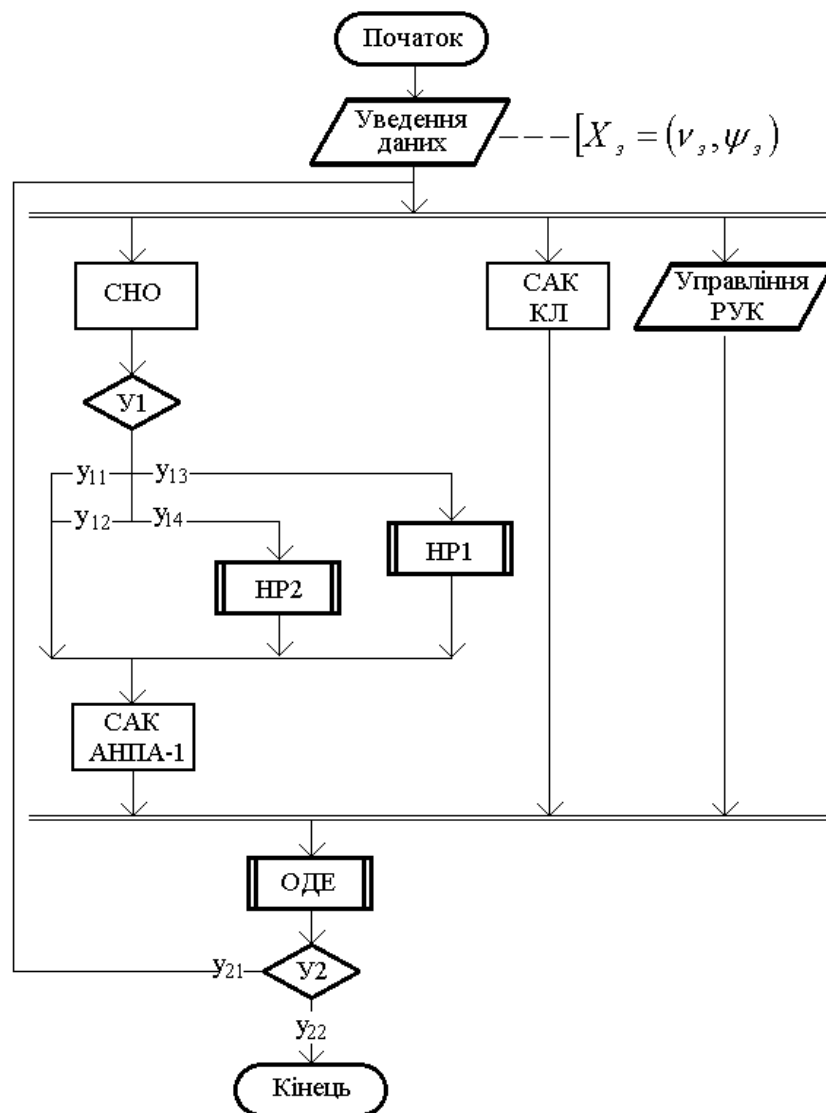


Рисунок 4.4 – Блок-схема узагальненого алгоритму проведення морського натурального експерименту

Експеримент починається з уведення оператором заданих швидкості прямолінійного руху і курсу АНПА-1. Далі паралельно виконуються 3 процеси.

Якщо в межах видимості СНО АНПА-1 об'єктів не виявлено (умова u_{11}), то апарат рухається прямолінійно, підтримуючи значення параметрів процесу руху, задані оператором.

У випадку наявності в зоні видимості СНО стороннього об'єкта САК рухом АНПА-1 виконує одну з наступних дій:

- якщо об'єкт виявлено у зоні проходження «Track Zone» (умова u_{12}), АНПА-1 буде продовжувати прямолінійний рух заданим курсом;

- якщо об'єкт виявлено у зоні небезпеки «Danger Zone» (умова u_{13}), САК АНПА-1 буде реалізовувати режим адгезії (набір правил НР1), тобто керуючі впливи, сформовані САК, будуть спрямовані на збільшення дистанції до об'єкта;

- якщо об'єкт виявлено у зоні притягання «Attraction Zone» (умова u_{14}), САК апарата буде функціонувати в режимі когезії (набір правил НР2) і керуючі впливи САК будуть спрямовані на зменшення дистанції до об'єкта.

Одночасно САК кабельною лебідкою (КЛ) АНПА-1 мінімізує зовнішні збурення, створювані кабелем зв'язку, шляхом керування процесом витравлювання/вибирання кабелю в процесі руху апарата.

Також у процесі проведення експерименту оператор АНПА-2 управляє рухом РКК за допомогою спеціального поста керування (ПК).

Результати виконання трьох зазначених процесів обробляються блоком обробки даних експерименту (ОДЕ), після чого перевіряється умова U_2 завершення поточного випробування (відповідно, умови u_{21} і u_{22}).

4.1.4. Попередня підготовка до морських натурних випробувань. В процесі попередньої підготовки до натурального експерименту отримано діаграми спрямованості чотирьох ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0 виробництва фірми MaxBotix. Діаграма спрямованості – одна з найбільш важливих характеристик для сенсорів дистанції. Вона є графічним зображенням області, у якій об'єкт може бути виявлений сенсором. Принцип роботи ультразвукових сенсорів заснований на вимірі часу проходження прямої та відбитої ультразвукових хвиль.

На рис. 4.5 наведено зовнішній вид лабораторного стенду, призначеного для визначення діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до морського натурального експерименту.



Рисунок 4.5 – Стенд для визначення діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів: 1 – блок живлення; 2 – ультразвуковий далекомір моделі MB 1003-EZ0; 3 – осцилограф; 4 – макет АНПА-1

Лабораторний експеримент виконано згідно схемі, зображеній на рис. 4.6. Далі надається короткий опис процесу проведення експерименту.

Підводний апарат установлюється на видаленні h від сенсора таким чином, щоб його діаметральна площина була перпендикулярна прямій, проведеній через центр сенсора й центр величини АНПА-сусіда. Після чого апарат вручну переміщують уздовж поздовжньої осі вліво до моменту, коли показання сенсора зміняться до значення, яке відповідає максимальній вимірюваній дистанції.

Потім макет АНПА-сусіда зміщують в напрямку вихідного місця розташування до поновлення початкових показань сенсора та вимірюють відстань l між вихідним (початковим) і поточним місцем його розташування.

У такий же спосіб виконується вимірювання відстані l при русі макета АНПА-сусіда праворуч.

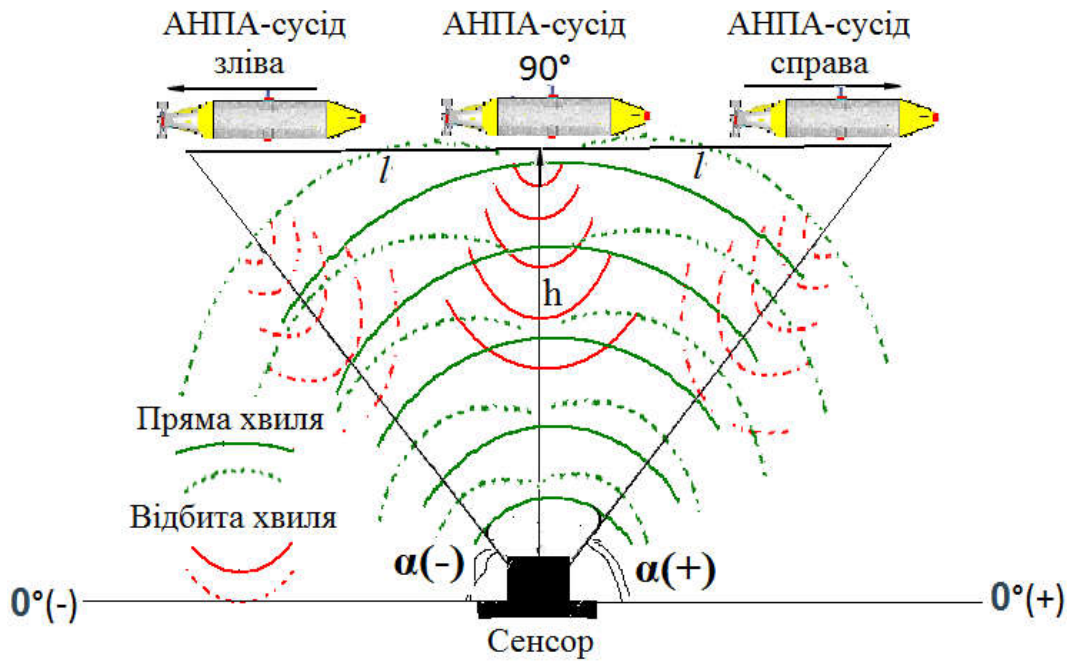


Рисунок 4.6 – Схема проведення лабораторного експерименту для зняття діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0

Дані виміри повторюються для діапазону $h = [1,0; 3,0]$ м із кроком 0,5 м. Для отриманих відстаней розраховують максимальні кути відхилення центра величини макета АНПА-сусіда від центра сенсора.

Результати експерименту представлені в табл. 4.1, а графічне подання діаграми спрямованості зображене на рис. 4.7.

Таблиця 4.1. Результати лабораторного дослідження

Сен- сор	Сенсор-1		Сенсор-2		Сенсор-3		Сенсор-4	
	$l(-)$, м	$l(+)$, м	$l(-)$, м	$l(+)$, м	$l(-)$, м	$l(+)$, м	$l(-)$, м	$l(+)$, м
h , м								
3	-0,48	0,57	-0,56	0,59	-0,55	0,64	-0,56	0,56
2,5	-0,57	0,57	-0,55	0,63	-0,52	0,61	-0,66	0,77
2	-0,51	0,55	-0,57	0,67	-0,69	0,63	-0,84	0,58
1,5	-0,81	0,80	-0,65	0,75	-1,00	0,71	-0,76	0,98
1	-0,96	1,01	-0,93	1,07	-1,1	0,91	-1,08	0,93

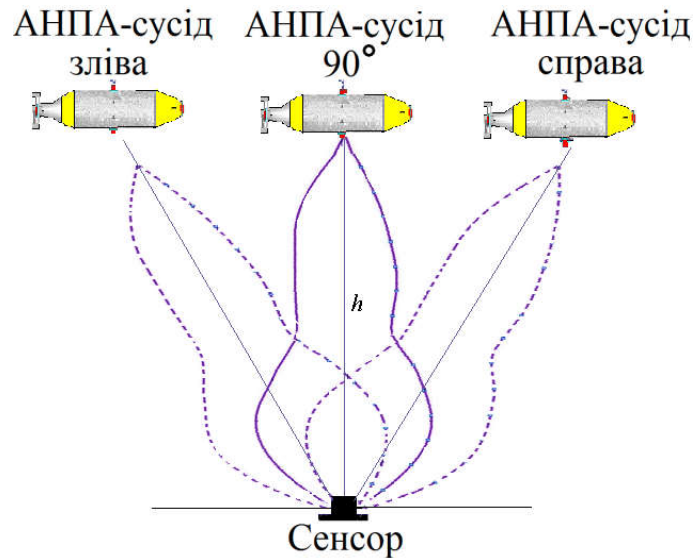


Рисунок 4.7 – Експериментально знята діаграма спрямованості

Знаючи час поширення сигналу (до цілі та в зворотному напрямку), визначають відстань до цілі. Швидкість поширення ультразвуку в повітрі приблизно дорівнює 344 м/с при 20°C (так само як і звуку).

Отже, час T , необхідний для поширення сигналу до макету АНПА-2 x (см) і назад, складе:

$$T = \frac{2x}{344 \cdot 10^2}.$$

Отримані діаграми спрямованості показують, що для забезпечення якісного керування дистанцією АНПА-1 до об'єктів, які становлять навігаційну загрозу, необхідно розташовувати сенсори так, щоб прямі лінії, які проходять через їхні центри, знаходились під кутом не більше 10° одна від одної.

4.1.5. Використання групи сенсорів для визначення положення АНПА-сусіда. Одночасне використання декількох сенсорів забезпечить кілька переваг у порівнянні з даними від одного сенсора. По-перше, якщо використовуються декілька ідентичних сенсорів (наприклад, ідентичні сенсори, що відслідковують об'єкт, який рухається), об'єднання спостережень поліпшить оцінку положення й швидкості цього об'єкта.

По-друге, крім метрологічних характеристик важливе значення має можливість групової роботи декількох сенсорів, як буде показано в наступному випробуванні із чотирма сенсорами одночасно. Практика науково-дослідної лабораторії «Дельта» показує, що доцільним є використання 4 сенсорів для більшої ефективності при виявленні об'єктів.

На рис. 4.8 показано зовнішній вигляд 4-х сенсорів – ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до участі у морському натурному експерименті.

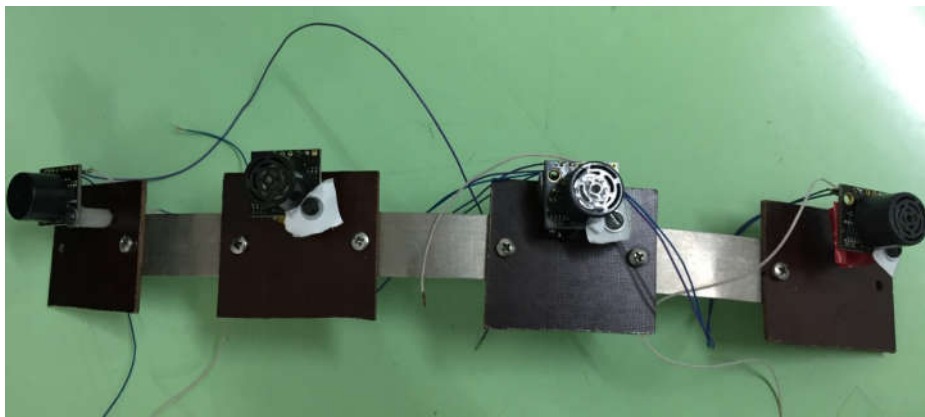


Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд групи ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до участі у морському натурному експерименті

Діаграми, отримані в табл. 4.1, об'єднано таким чином, щоб досягти максимально можливої ширини діаграми спрямованості системи без істотного зменшення максимальної дистанції розпізнавання об'єкта (рис. 4.9).

Для розглянутих сенсорів даного ефекту можна досягти, розташувавши їх таким чином, щоб прямі, що проходять через їхні центри перебували під кутом не більше 10° одна до одної. При цьому ширина діаграми спрямованості в ближній зоні ($h = 0,3 \dots 2$ м) склала $2,5 \dots 3$ м, а в далекій зоні ($h = 2 \dots 3$ м) – 4 м.

4.2 Основні результати морських натурних випробувань САК АНПА

4.2.1. Морський натурний експеримент. Проводився на акваторії Дніпро-Бузького лиману (м. Миколаїв) з борту спеціального судна забезпечення.

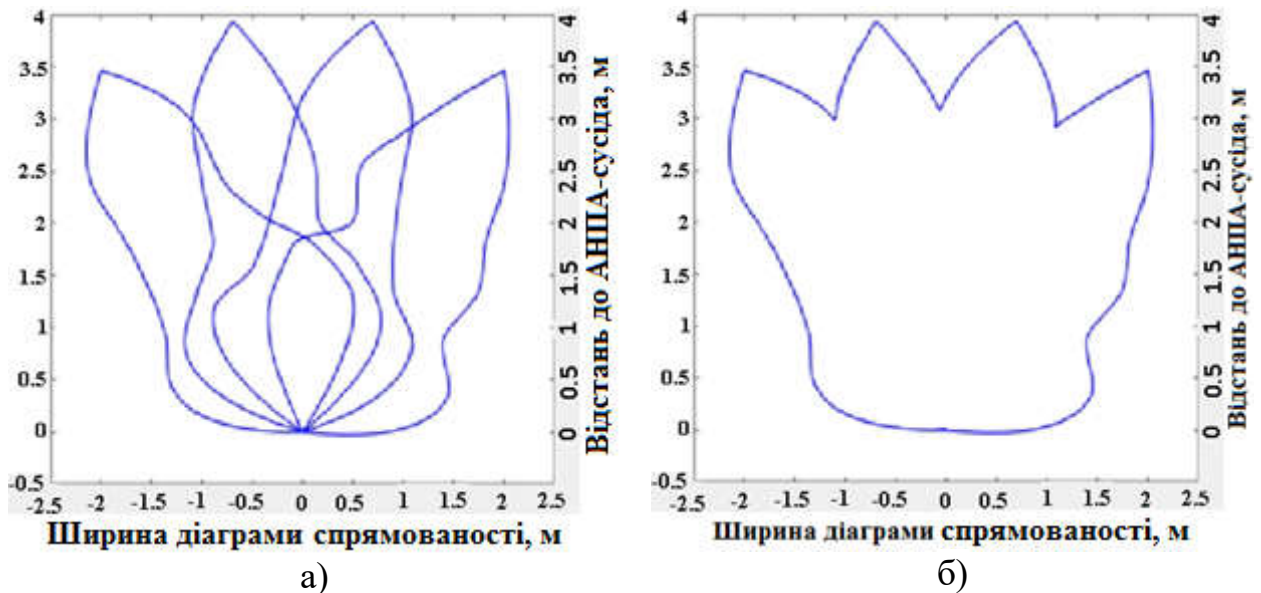


Рисунок 4.9 – Діаграма спрямованості чотирьох ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0: а) розташування сенсорів; б) результуюча діаграма

У якості такого судна було залучено науково-дослідне судно «Дельта» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

На рис. 4.10 показано фотофрагменти випробувань.

Морський натурний експеримент проводився згідно алгоритму, наведеному на рис. 4.4, у такій загальній послідовності:

1) Оператор задає параметри руху АНПА-1, активує САК АНПА-1 і очікує моменту завершення перехідного процесу.

2) У процесі керованого руху АНПА-1 оператор за допомогою ПК РКК керує рухом АНПА-сусіда, створюючи умови для перевірки адекватності функціонування режимів адгезії й когезії. При цьому виконується цифрове документування перехідних процесів, які протікають в САК АНПА-1.

3) Дані, накопичені в ході проведення експерименту, зберігаються у блоці ОДЕ, після чого проводиться аналіз якості процесів керування рухом АНПА-1 і коригування налаштувань регуляторів САК.

4) Пункти 1-3 наведеної послідовності повторюються до моменту досягнення бажаної якості перехідних процесів і процесів керування груповим рухом.



Рисунок 4.10 – Фотофрагменти морських натурних випробувань САК АНПА як «агента» групи: 1 – обидва макети АНПА відділені один від одного і рухаються з заданими швидкостями; 2 – макет АНПА-1 і макет АНПА-сусіда перебувають у зоні притягання, тому САК макетом АНПА-1 реалізує режим когезії (макет АНПА-1 наближається до макета АНПА-сусіда); 3 – макети АНПА розташовані занадто близько; 4 – макети розташовані у зоні небезпечного зближення; САК макета АНПА-1 змінює курс апарата на віддалення від макета АНПА-сусіда; 5 – макет АНПА-1 віддалився від макета АНПА-сусіда і режим адгезії виконано; 6 – безпечний режим, коли обидва макети почали вільно рухатись заданими курсами та швидкостями

4.3. Аналіз результатів морських натурних випробувань САК АНПА

Розглянемо результати експериментальної перевірки працездатності САК АНПА-1, отримані шляхом морських натурних випробувань [139]. Експериментальне дослідження регулятора дистанції АНПА-1 почнемо з перевірки режиму адгезії. Перед початком експерименту АНПА-1 був виведений на відстань 0,5 м від АНПА-сусіда.

Графіки перехідного процесу наведені рис. 4.11.

При амплітуді задачі керування, рівній 1,5 м, перехідний процес має аперіодичний характер з перерегулюванням 6,7%. Тривалість перехідного процесу склала 25 с.

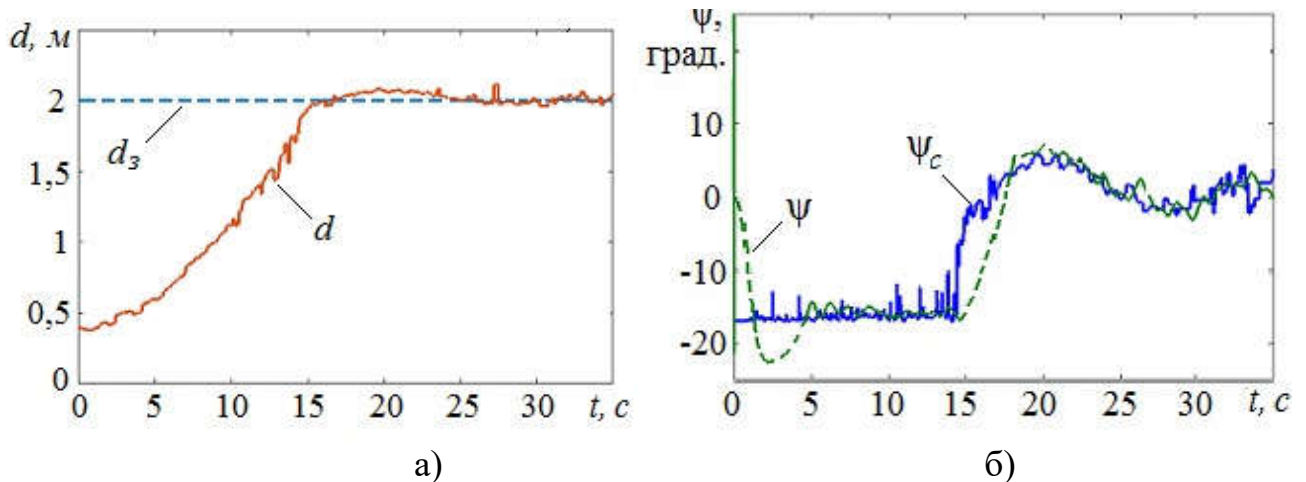


Рисунок 4.11 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії:

а) дистанція; б) керуючий вплив

АНПА-1 рухається заданим курсом, за винятком ділянки завершення перехідного процесу (часовий інтервал 15...20 с). У цьому випадку РСК апарата не може забезпечити задану швидкість зміни курсу, що призводить до появи перерегулювання.

Розглянемо тепер працездатність САК АНПА-1 в режимі когезії. Графіки перехідних процесів зображені на рис. 4.12.

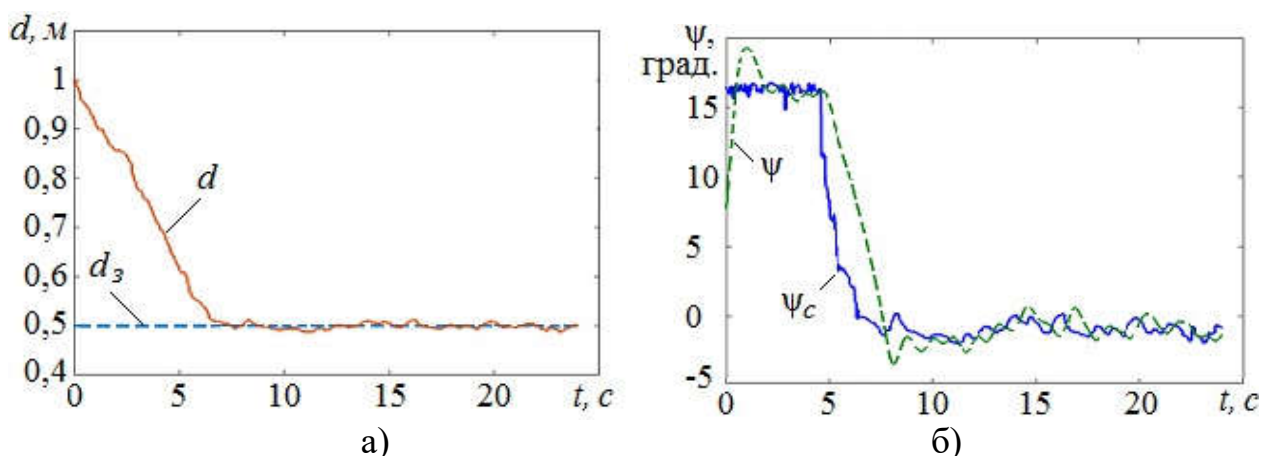


Рисунок 4.12 – Графіки перехідних процесів в режимі когезії

а) дистанція; б) керуючий вплив

Перехідний процес також має аперіодичний характер. Перерегулювання складо 2 %, а тривалість перехідного процесу – 10 с.

Перевіримо тепер працездатність САК АНПА-1 при впливі на його корпус зовнішніх збурень. Графіки перехідних процесів для даного режиму зображені на рис. 4.13.

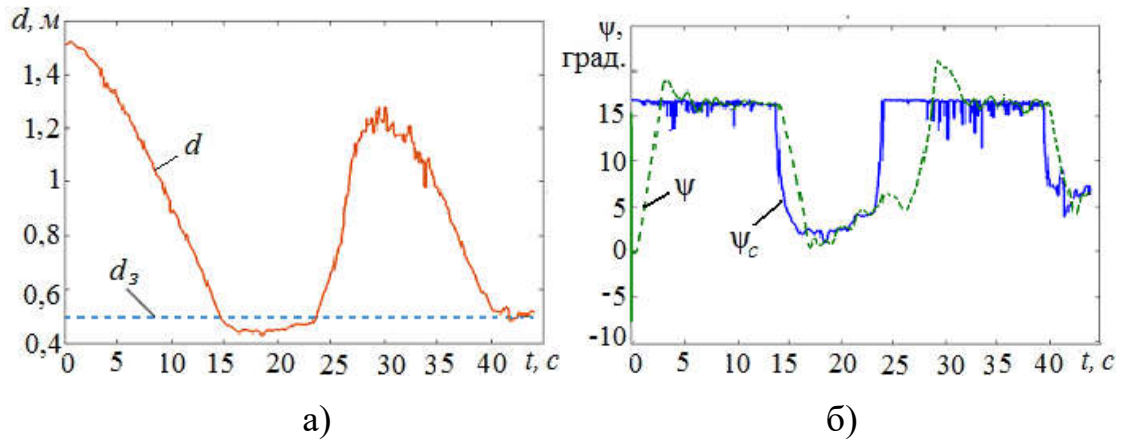


Рисунок 4.13 – Графіки перехідних процесів при дії зовнішніх збурень:

а) дистанція; б) керуючий вплив

На початку експерименту апарат був відведений на відстань 1,5 м від АНПА-сусіда. По закінченні перехідного процесу шляхом віддалення АНПА-сусіда від АНПА-1 було створено збурюючий вплив амплітудою 0,8 м. Наслідки даного впливу САК АНПА-1 усунула через 15 с з моменту закінчення його прикладення.

Дослідимо тепер динамічні властивості САК АНПА-1 шляхом завдання сигналу керування, який змінюється за гармонічним законом (рис. 4.14).

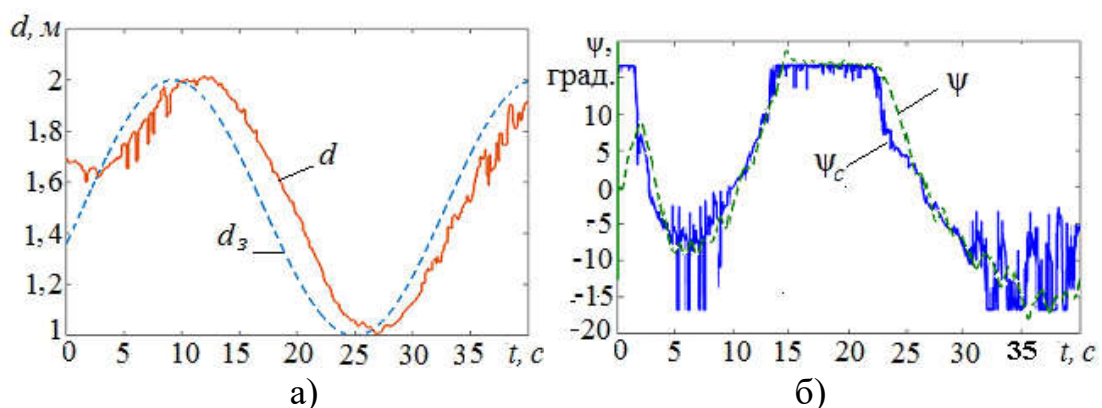


Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів при гармонічному сигналі

керування: а) дистанція; б) керуючий вплив

Сигнал керування має наступні параметри: зсув – 1,5 м, амплітуда – 0,5 м; частота – $0,2 \text{ с}^{-1}$. Перехідний процес завершується через 5 с з після початку експерименту. Апарат рухається по синусоїдальній траєкторії із запізнюванням щодо сигналу керування в 2 с.

За результатами натурних випробувань можна зробити висновок про прийнятність запропонованого підходу для реалізації законів групового керування рухом АНПА.

Висновки до розділу 4

1. На основі аналізу особливостей організації та проведення морського натурального експерименту САК АНПА обґрунтовано можливість і доцільність проведення такого експерименту з використанням системи акустичних сенсорів та використання у якості дослідного АНПА-1 телекерованого по кабелю підводного апарата, а в якості АНПА-сусіда – радіокерованого катера.

2. На основі розробленої «Програми і методики проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи» запропоновано блок-схему узагальненого алгоритму проведення морського натурального експерименту та виконано лабораторні дослідження системи акустичних сенсорів як основної складової системи навігаційної обстановки АНПА-1.

3. Проведено морські натурні випробування САК макета АНПА-1 як «агента» групи, який працює в умовах навігаційної близькості інших АНПА групи. У якості основних режимів було перевірено працездатність САК АНПА-1 у режимах адгезії, когезії та синусоїдального керуючого сигналу.

4. Аналіз отриманих результатів підтвердив працездатність САК АНПА-1 як «агента» групи підводних апаратів, зокрема, забезпечення безпечного руху АНПА-1 завдяки реалізації режимів адгезії і когезії.

Основні матеріали розділу 4 опубліковано в [132, 135].

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 моделюючого 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 морської операції при наявності та відсутності обмежень технічного характеру.

6. Для підвищення продуктивності підводних пошукових операцій на віддалених морських акваторіях **удосконалено** процес керування безекіпажним морським комплексом у складі безекіпажного надводного судна з групою автономних ненаселених підводних апаратів на борту шляхом уведення десяти етапів його виконання, які охоплюють автоматично виконувані операції переходу безекіпажного надводного судна у задану акваторію, випуск групи АНПА та їх узгоджений рух у район пошуку, виконання пошукових операцій та повернення на безекіпажне 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 перерегулюваннями 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, що працює в умовах навігаційної близькості інших АНПА..

9. Теоретичні результати дисертаційних досліджень впроваджені у Державному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» (м. Миколаїв) при формування 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amy N., Lonny L.. (2009). HROV Nereus Expedition to the Mariana Trench. *WHOI* <http://www.whoi.edu/page.do?pid=32815&tid=282&cid=57366>
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. (2005). Автономные подводные роботы: системы и технологии. *М.: Наука*.
3. Robert W. Button, John Kamp, Thomas B. Curtin, James Dryden. (2009). A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles. *National Defense Research Institute. RAND Corporatio. 189 Pages.*
<https://www.rand.org/pubs/monographs/MG808.html>
4. U.S. Navy. (2014). The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV). *Master Plan Paperback.* <https://www.amazon.com/Navy-Unmanned-Undersea-Vehicle-Master/dp/1505437318>
5. Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Сидоренко В. В. (2008). Подводные роботы в минной войне : монография. *Калининград : Янтар. сказ, 116 с.*
6. Ocean Studies Board. (2009). Oceanography and Mine Warfare. *Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., 2000. 112 pages.*
7. J. Ferber. (1999). Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. *Addison Wesley Longman.*
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/reviews/rouchier.html>
8. Edward Fiorelli, Naomi Ehrich Leonard, Pradeep Bhatta, Derek Paley. (2004). Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. – Proc. *IEEE Autonomous Underwater Vehicle. Workshop on Multiple AUV Operations (AUV04).* pp. 1-14. <https://www.princeton.edu/~naomi/AUV13July04.pdf>
9. Mark Read, Christoph Möslinger, et.al. (2013). Profiling Underwater Swarm Robotic Shoaling Performance Using Simulation. [*Conference Towards Autonomous Robotic Systems TAROS*](#) pp. 404-416. DOI: 10.1007/978-3-662-43645-5_42

10. Hydromea Project. Available at: <https://www.hydromea.com/vertex-autonomous-underwater-swarm/>
11. NOC Presents New Robotic Microsub. <https://www.offshore-energy.biz/noc-presents-new-robotic-microsub/>
12. Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Потехин Ю.П., Путинцев И.А., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н. (2017) Разработка автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро с функцией группового управления. *Известия ЮФУ. Технические науки*. С. 55-74. DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-5574. <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-avtonomnyh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov-klassa-mikro-s-funktsiey-gruppovogo-upravleniya>
13. S. Mintchev, E. Donati, S. Marrazza, C. Stefanini. (2014). Mechatronic design of a miniature underwater robot for swarm Operations. *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA) Hong Kong Convention and Exhibition Center*. Hong Kong, China. Pages 2938-2943. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6907282>
14. Г. В. Бабкін, В. С. Блінцов, Є. А. Дружинін, С. Г. Кійко, Н. Р. Книрик, К. В. Кошкін, Д. М. Крицький, С. С. Рижков, С. О. Слободян, Т. А. Фаріонова. (2017). Управління успішними проектами створення складної техніки : Монографія. Миколаїв : *Видавництво Торубари В. В.*,— 336 с.
15. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Гребеняк А.В. (2009). Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”*. — № 650. – С. 167–173.
16. Michael Wooldridge. (2009). An Introduction to MultiAgent Systems. *John Wiley & Sons*. 484 p. <https://www.wiley.com/en-us/An+Introduction+to+MultiAgent+Systems%2C+2nd+Edition-p-9780470519462>
17. Heiko Hamann. (2018). *Swarm Robotics: A Formal Approach*. Springer. 221 pages. <https://www.amazon.com/Swarm-Robotics-Approach-Heiko-Hamann/dp/3319745263>

18. Бычков, И.В., Кензин, et.al. Методы и подходы к решению задач группового управления автономными подводными аппаратами. *ДВО РАН*. pp. 1-6. Retrieved from <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/41846/46886/Bychkov.pdf>
19. Кунцевич В.М. (2011). Некоторые задачи управления групповым движением подвижных роботов. *Автоматика/Automatics*. НУ «Львівська політехніка». – С. 23.
20. Collective Cognitive Robots. Retived from <https://cordis.europa.eu/project/id/270382>
21. Collective Cognitive Robots (CoCoRo) Retrieved from https://www.up2europe.eu/european/projects/collective-cognitive-robots_9980.html
22. Payam Zahadat, Thomas Schmickl. (2016). Division of Labor in a Swarm of Autonomous Underwater Robots by Improved Partitioning Social Inhibition. Adaptive Behavior. *Research Article*. 24(2) 87-101. <https://doi.org/10.1177/1059712316633028>
23. Thomas Schmickl, Ronald Thenius, et.al. (2011). CoCoRo: The self-aware swarm of underwater robots. *Semantic scholar*. pp. 1-2. <https://pdfs.semanticscholar.org/8d6a/a89ad54995f0f46306909dd02337a99dbbd2.pdf>
24. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura. (2011). Multi-Robot Systems, Trends and Development. *InTech*. – 596 Pages. <https://1lib.eu/book/2057236/b4e053?regionChanged=&redirect=5617196>
24. (2011). Проект CoCoRo: коллективное сознание роя подводных роботов. *Robotics - Мир роботехники*. Retrieved from http://robotics.ua/news/prototypes/4497-project_cocoro_swarm_collective_consciousness_underwater_robots
25. Проект CoCoRo: коллективное сознание роя подводных роботов. Retrieved from http://robotics.ua/news/prototypes/4497-project_cocoro_swarm_collective_consciousness_underwater_robots
26. 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 (2011). Створення універсальних

транспортних суден і засобів океанотехніки: Миколаїв: Видавництво НУК. – 340 с..

27. Swarm - система управління "роем" боевых роботов. (2015) <http://www.modernarmy.ru/article/228>

28. Michael Wooldridge. (2009). An Introduction to MultiAgent Systems, 2nd Edition. John Wiley & Sonns, LTD, 484 Pages. <https://www.wiley.com/en-us/An+Introduction+to+MultiAgent+Systems%2C+2nd+Edition-p-9780470519462#download-product-flyer>

29. Wei Ren and Randal W. Beard. (2008). Distributed consensus in Multi vehicle cooperative control. Theory and Applications. Springer-Verlag, London Limited. 319 Pages. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84800-015-5>

30. Zhongkui Li, Zhsheng Duan. (2015). Cooperative Control of Multi-Agent Systems - A Consensus Region Approach. CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC. 250 Pages. <https://www.routledge.com/Cooperative-Control-of-Multi-Agent-Systems-A-Consensus-Region-Approach/Li-Duan/p/book/9781138073623>

31. Joanna Kwiecień (2018). A Swarm-Based Approach to Generate Challenging Mazes. *Entropy* pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/e20100762>

32. 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. ДНВЦ ЗС України. – Чернігів : Видавець Брагинець О.В. С. 48-49.*

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

34. Maria Enayat, K. Khorasani. (2015). Semi-decentralized nonlinear cooperative control strategies for autonomous underwater vehicles. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 27(16)· DOI: 10.1002/rnc.3707
35. Gen'ichi Yasuda. (2015). Distributed Autonomous Control Architecture for Intelligent Mobile Robot Systems. *Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition*. pp. - 10. doi: 10.4018/978-1-4666-5888-2.ch650
36. Mhadhevan Mandhu and M. Sreekumar. (2017). Implementation of role assignment and fault tree analysis for multi robot interaction. *International Journal of Robotics and Automation*. Vol. 32, No. p. 214-223. DOI: 10.2316/Jornal.206.2017.206-4448
37. И.М. Макаров, и другие. (2012). Смешанные стратегии группового управления в многоагентных робототехнических системах. *Известия ЮФУ. Технические науки*. с. 8-13. <https://cyberleninka.ru/article/n/smeshannye-strategii-gruppovogo-upravleniya-v-mnogoagentnyh-robototekhnicheskikh-sistemah>
38. Водолазский И.А., Егоров А.С., Краснов А.М. (2017). Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации. *Молодой учёный* №4 (138). С. 147-153. — URL <https://moluch.ru/archive/138/38900>
39. Dunwen Wei, Feiran Wang and Hongjiao Ma. (2019). Autonomous Path Planning of AUV in Large-Scale Complex Marine Environment Based on Swarm Hyper-Heuristic Algorithm. *Appl. Sci.* 9(13), pp. 22. DOI: 10.3390/app9132654
40. Nicole El Zoghby, et.al. (2014). Robot Cooperation and Swarm Intelligence. Wireless Sensor and Robot Networks: From Topology Control to Communication Aspects, *World Scientific Publishing Company*. pp.168-201. fhal-00917542

41. Yudong Zhang Praveen Agarwal Vishal Bhatnagar Saeed Balochian and Jie Yan. Swarm Intelligence and Its Applications. *The Scientific World Journal*. Volume 2013. Article ID 528069. 3 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/528069>

42. Блінцов В.С., Алоба Л.Т., Тхи Д.Ф. (2016). Современные задачи группового управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов. *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв НУК. 3(465). – С. 91-99. <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2016/3/15.pdf>

43. Голембо В.А., Бочкаръов О.Ю., Гребеняк А.В. (2009). Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», № 650, – С.167-173.

44. Блінцов С.В., Тхи Д.Ф. (2012). Задачі автоматичного керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу // «Збірник наукових праць НУК» . Миколаїв: НУК, – №5-6. – С. 64-68.

45. Блінцов С.В., Тхи Д.Ф. (2013). Особливості групового керування автономними підводними апаратами при виконанні морських пошукових робіт. «*Восточно-Европейский журнал передовых технологий*». – №6/9(66). – С. 56-60. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2013_6%289%29_12

46. Голембо В.А., Гребеняк А.В. (2012). Організація навігації у колективі автономних мобільних роботів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. «Комп'ютерні системи та мережі». Львів : №745. – С. 61-68. <http://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/number-745-2012/organizaciya-navigaciyi-v-kolektivi-avtonomnih-mobilnih>

47. Блінцов С.В., Тхи Д.Ф. (2013). Автоматизація керування підводним апаратом в умовах невизначеності його параметрів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. – Миколаїв : НУК. №4. – С. 89-92.

48. Ming Chen, Qiang Zhan, Sanlong Cai (2007). Control System Design of an Autonomous Underwater Vehicle. IEEE Conference “*Robotics, Automation and Mechatronics*”. DOI: 10.1109/RAMECH.2006.252736

49. Jesus Arturo Monroy-Anieva, Cyril Rouviere, Eduardo Campos-Mercado, Tomas Salgado-Jimenez, Luis Govinda Garcia-Valdovinos (2018). Modeling and Control of a Micro AUV: Objects Follower Approach. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111779/73>.

50. Charalampos P. Bechlioulis, Fotis Giagkas, George C. Karras and Kostas J. Kyriakopoulos (2019). Robust Formation Control for Multiple Underwater Vehicles. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00090>

51. Xin Li, Daqi Zhu, Yuang Quian (2014). A Survey on Formation Control Algorithms for Multi-AUV System. – *Unmanned Systems*, Vol. 2, №4. Pages 351-359.

52. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков А.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин М.Ю. (2009). Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов. «Подводные исследования и робототехника». № 2(8). С. 34-43. http://www.imtp.febras.ru/images/stories/journal/2_8_2009/34_43.pdf

53. Мартынова Л.А., Машошин А.И. (2016). Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии. – *Известия ЮФУ. Технические науки*. – С. 38-48. <https://cyberleninka.ru/article/n/ostroenie-sistemy-upravleniya-avtonomnyh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov-na-baze-multiagentnoy-tehnologii>

54. Машошин А.И., Скобелев П.О. (2016). Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов. – *Известия ЮФУ. Технические науки*. С. 45-59. <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-multiagentnyh-tehnologiy-dlya-upravleniya-grupпой-avtonomnyh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov>

55. Jörg Kalwa. (2010). Final Results of the European Project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. *IFAC Proceedings Volumes. Volume 43, Issue 16*, Pages 181-186. doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2010.00033

56. A. Pedro Aguiar, J. Almeida, M. Bayat, B. Carneira, R. Cunha, A. Häusler, P. Maurya, A. Oliveira, A. Pascoal, A. Pereira, M. Rufino, L. Sebastião, C. Silvestre,

F. Vanni. (2009). Cooperative Control of Multiple Marine Vehicles Theoretical Challenges and Practical Issues. *IFAC Proceedings Volumes. Volume 42, Issue 18*, Pages 412-417. doi.org/10.3182/20090916-3-BR-3001.0072

57. В. Д. Немцов, Л. Є. Довгань. (2001). Стратегічний менеджмент : Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. К: ТОВ "УВІПК "ЕксОб", - 560 с.

58. Zhongkui Li, Zhisheng Duan. (2014). Cooperative Control of Multi-Agent Systems: A Consensus Region Approach (Automation and Control Engineering). CRC Press; 1 edition.– 262 pages. <https://www.amazon.com/Cooperative-Control-Multi-Agent-Systems-Engineering/dp/1466569948>

59. Матвиенко Ю.В., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Щербатюк А.Ф. (2016). Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. С. 123.141. <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-povysheniya-effektivnosti-avtonomnyh-podvodnyh-robotov>

2 60. Блінцов В.С, В.А.Надточій (2012). Моделюючий комплекс для дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи "судно-носій – підводний апарат – маніпулятор" *Вісник НУК*. №3. С. 261-266

61. Mastufa Dinc (2018). Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Dynamics. *Chapter in Book "Mobile Robots" - Volume 1*. Publisher: InTechOpen Ltd. Pp.1-20.

https://www.researchgate.net/publication/325828234_Modeling_Simulation_of_Autonomous_Underwater_Vehicle_Dynamics

62. Claus Beisbart, Nicole J. Saam. (2019). Computer Simulation Validation. Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives. *Springer Verlag*. 1074 pages. <https://www.springer.com/gp/book/9783319707655>

63. Nuno Cruz (2011). Autonomous Underwater Vehicles. *InTech*. DOI: 10.5772/923

64. Блінцов О. В. (2018). Системи автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками : *навчальний посібник*. Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 251 с.
65. 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
66. Андерсон Д., Танехилл Дж. (1990). *Autonomous Underwater Vehicles*. *InTech*. DOI: 10.5772/923Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т.: Пер с англ. – М.: МИР. 384 с.
61. Fossen T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. *John Wiley & Sons Ltd*. 596 p. doi: 10.1002/9781119994138
62. Stern F., Yang J., Wang Z., Sadat-Hosseini H., Mousaviraad M., Bhushan S., Xing T. (2013). Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward. *International Shipbuilding Progress*. Vol. 60, Issue 1–4. P. 3–105. doi: 10.3233/ISP-130090
63. Antonelli G. (2014). *Underwater Robots*. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 279 p. doi: 10.1007/978-3-319-02877-4
70. Geisbert, J. S. (2007). Hydrodynamic modeling for autonomous underwater vehicles using computational and semi-empirical methods : *PhD thesis / Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University*, 87 p.
71. Под ред. Я.И. Войткунского. (1985). *Справочник по теории корабля*: В 3 т. Л.: Судостроение, Т.1. – 768 с.
72. Алоба Л.Т. (2020). Разработка специализированного моделирующего комплекса для исследования управляемого движения группы АНПА. *Інновації в суднобудування та океанотехніці: Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 121-127.
73. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. 2007) Системи автоматического управления движением судна : 3-е изд., перераб. и доп. *Одесса : Феникс*, 328 с.

74. Fossen T. (2014) Mathematical Models of Ships and Underwater Vehicles. In: *Baillieul J., Samad T. (eds) Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_121-2

75. Fedorenko Roman, Gurenko B.V. (2016) Autonomous Underwater Vehicle Mathematical Model and Simulator. Publication: *ICCMA '16: Proceedings of the 4th International Conference on Control, Mechatronics and Automation*. Pages 56–60. DOI: [10.1145/3029610.3029639](https://doi.org/10.1145/3029610.3029639)

76. Mustafa Dinç. (2018) Modeling & Simulation of Autonomous Underwater Vehicle Dynamics. In book: *Mobile Robots - Volume 1*. Publisher: *InTechOpen Ltd*. https://www.researchgate.net/publication/325828234_Modeling_Simulation_of_Autonomous_Underwater_Vehicle_Dynamics#read

77. Brooks Louis-Kiguchi Reed. (2015) Controller Design for Underwater Vehicle Systems with Communication Constraints [Text] / *Brooks Reed*. – *Massachusetts Institute of Technology*. – 301 p.

78. European Project MORPH: next generation of underwater robotics for ocean exploration tested in the Azores [Electronic resource].– Retrieved from: <http://vicorob.udg.edu/fp7-european-project-morph-next-generation-of-underwater-robotics-for-ocean-exploration-tested-in-the-azores/>

79. Блінцов С.В., Доан Фук Тхи. (2012). Задачі створення спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження систем керування автономними підводними апаратами. // «Збірник наукових праць НУК» Миколаїв: НУК,– №3-4. С. 53-57.

80. 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.

81. Vinicius Graciano Santos, [Luiz Chaimowicz](https://doi.org/10.1017/S0263574714000563). (2014). Cohesion and segregation in swarm navigation. *Robotica*. 32(2). pp. 209-223 DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000563>

82. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: "Радиоаматор", 2008. – 972 с.

83. Жмудь В.А. (2019). Моделирование замкнутых систем автоматического управления. : учеб. пособие / В. А. Жмудь . - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Юрайт, - 128 с.

https://studme.org/101803/informatika/obespechenie_korrektности_vychisleniya_stars_hih_proizvodnyh_tsifrovom_regulyatore

84. Навігація. (2006). Основи визначення місцеположення та скеровування / Б. Гофманн-Велленгоф, К. Легат, М. Візер ; пер. з англ. за ред. : Я. С. Яцківа ; літ. ред. : О. Є. Смолінська. — Л.: ЛНУ ім. І. Франка,— 449 с.

85. Радіогідроакустичні буї розробки Київського НДІ Гідроприладів. ОПК України. <https://stailker.dreamwidth.org/274934.html>

86. Matthias Pätzold, Neji Youssef, Carlos A. Gutierrez. (2012) Modeling and Simulation of Mobile Radio Channels. *Modelling and Simulation in Engineering / Volume 2012*. <https://doi.org/10.1155/2012/160297>

87. Jie Huang, Michel Barbeau, Stephane Blouin, Craig Anthony Hamm. (2017) Simulation and Modeling of Hydro Acoustic Communication Channels with Wide Band Attenuation and Ambient Noise. *International Journal of Parallel Emergent and Distributed Systems* 32(5). DOI: [10.1080/17445760.2016.1169420](https://doi.org/10.1080/17445760.2016.1169420)

88. Farhan A Faruqi. (2000) Non-linear mathematical model for integrated global positioning/inertial navigation systems. *Applied Mathematics and Computation* 115(2-3):191-212. DOI: [10.1016/S0096-3003\(99\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(99)00188-5)

89. Karol Listewnik. (2011) Hydroacoustic Multi-Sensor for Positioning Underwater Robots. *Solid State Phenomena*, ISSN: 1662-9779, Vol. 180, pp. 145-151. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.180.145>

90. Jie Huang, Michel Barbeau, Stephane Blouin, Craig Anthony Hamm. (2017) Simulation and Modeling of Hydro Acoustic Communication Channels with Wide Band Attenuation and Ambient Noise. *International Journal of Parallel Emergent and Distributed Systems*, 32(5). DOI: [10.1080/17445760.2016.1169420](https://doi.org/10.1080/17445760.2016.1169420)

91. Volodymyr Blintsov, Leo Tosin Aloba. (2019). Control automation of maritime unmanned complex with a group of autonomous underwater vehicles. EUREKA: *Physics and Engineering*. Number 4. pp. 54-62. DOI: <http://110.21303/2461-4262.2019.00940>

92. Aloba Leo Tosin. (2019). Synthesis of intelligent automatic control system of an autonomous underwater vehicle as a group agent.// [Tekst]/L. T. Aloba “*Shipbuilding and Marine Infrastructure*” – Миколаїв : НУК. №1 (11). pp. 74-84. [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).9](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).9)

93. Майер Р.В. (2020).Компьютерное моделирование: моделирование как метод научного познания. Компьютерные модели и их виды // Научный Retrieved from. URL: <http://econf.rae.ru/article/6722>

94. Nikola Štambuk, and Paško Konjevoda. (2017). Structural and Functional Modeling of Artificial Bioactive Proteins. *Information*. Volume 8 Issue 1. 29 pages. <https://doi.org/10.3390/info8010029>

95. Dmitriev V. M., Gandzha T.V., Kurin'ka V.S. (2018). Structural-functional scheme of a computer model of the smart hydroponic greenhouses. *Informatika i sistemy upravleniya*. No. 1(55). – P. 51-63. DOI: 10.22250/isu.2018.55.51-63

96. Chungen Yin, Lasse Rosendahl, Z. Luo. (2003). Simulation Modelling Practice and Theory. *Elsevier B.V.* 211–222. doi:10.1016/S1569-190X(03)00044-3

97. J. M. Durán & E. Arnold (Eds). (2013). Computer simulations and the changing face of scientific experimentation. *Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing*. pp. 76–98.

98. Авраменко П.Г., Буруніна Ж.Ю., Соколовський Г.П. (2005). Дослідження характеристик підйомного підводного апарата у дослідовому басейні. *Збірник наукових праць НУК*. – Миколаїв: НУК. — № 2. – С. 32-39.

99. Жуков Ю. Д. (2007). Мореходные качества корабля. — Николаев: *Издательство Наваль*,— 144 с.

100. Блінцов В.С, Буруніна Ж.Ю., Лонг Н.Т. (2005). Програмно-технічний комплекс для морських дослідницьких випробувань підводних буксированих систем. *Збірник наукових праць НУК.* – Миколаїв: НУК. №3 (402). – С.30-38.

101. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. (2009). Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М. : ФИЗМАТЛИТ,– 280 с.

102. Иванов Д.Я. (2011). Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово_применяемых микророботов в экстремальных условиях. *«Известия высших учебных заведений»*, - №9. – С. 70-78.

103. 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.

104. 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

105. Chatzichristofis S., A. Kapoutsis A., Kosmatopoulos E. B., Doitsidis L., Rovas D., Joao Borges de Sousa. (2017) The NOPTILUS project: Autonomous Multi-AUV Navigation for Exploration of Unknown Environments. *IFAC (International Federation of Automatic Control)*. <http://www.openarchivescy.com/Record/hephaestus-11728-10204/Description#tabnav>

106. Zygmunt Kitowsky, Ryszard Solinsky. (2016) Application of Domestic Unmanned Surface Vessels in the Area of Internal Security and Maritime Economy – Capacities and Directions for Development. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, №3(206). – DOI: 10.5604/0860889X. 1224747

107. Blintsov V., Aloba L. (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.

108. Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura. (2011). Multi-Robot Systems, Trends and Development, Edited by Published by *InTech*. – 586 pages.

109. Nikolaos Tsiogkas. (2014). Efficient multi-AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions. –Oceans - St. John's. – Pp. 1-6. Retrieved from: URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7003085&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7003085

110. 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.

111. Wang Guo, Song Wang, Wenqiang Dun. (2015). The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal* , Volume 7. Pages 150-156. <https://pdfs.semanticscholar.org/2c26/2aba710e0d1633d9b4b5015c013343f88fd3.pdf>

112. Launch & Recovery System. <https://hhenriksen.com/news/maritime/2013/02/launch-recovery-system>

113. Scott Willcox, Dani Goldberg, Jerome Vaganay, Joseph A. Curcio. Multi-vehicle cooperative navigation and autonomy with the bluefin cadre system. https://www.researchgate.net/publication/241654294_multi-vehicle_cooperative_navigation_and_autonomy_with_the_bluefin_cadre_system

114. Takumi Matsuda, ToshihiroMaki, Yoshiki Sato, Takashi Sakamaki, Tamaki Ura. (2017). Alternating landmark navigation of multiple AUVs for wide seafloor survey: Field experiment and performance verification. *Journal of Field Robotics*, Pages 359-395. <https://doi.org/10.1002/rob.21742>

115. Jiang Dapeng, He Bin. Realistic (2014). Cooperative Control Mechanism of Multiple AUVs. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. pp.-1395-1400

116. Michael R. Benjamin, Henrik Schmidt, Paul M. Newman, John J. Leonard. (2010). Nested Autonomy for Unmanned Marine Vehicles with MOOS-IvP. http://140.117.95.8/teacher/PUB/conference/Abstract_Schmidt.pdf

117. Cisco pxGrid: автоматизация передачи данных по нескольким платформам благодаря унифицированной архитектуре. Retrieved from: https://www.cisco.com/c/dam/global/ru_ru/about/brochures/assets/pdfs/white-paper-c11-735489.pdf

118. Liam Paull, S. Saeedi, H. Li. (2011). A Multi-Agent Framework for Autonomous Underwater Vehicles for Mine Countermeasures with MOOS-IvP. pp. 1-10.

119. Marwah Almasri, Khaled Elleithy, and Abrar Alajlan. (2016). Sensor Fusion Based Model for Collision Free Mobile Robot Navigation. *Sensors (Basel)*. pp. 24. doi:10.3390/s16010024

120. Taha Elmokadem, Mohamed Zribi, Kamal Youcef-Toumi. (2017). Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated Autonomous Underwater Vehicles. Volume 129. Pages 613-625. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.032>

121. Huang Hai, Zhang Guocheng, Qing Hongde, Zhou Zexing. (2017). Autonomous underwater vehicle precise motion control for target following with model uncertainty. *International Journal of Advanced Robotic Systems* pp. 1-11. DOI: 10.1177/1729881417719808

122. Hajer Omrane, Mohamed Slim Masmoudi, and Mohamed Masmoudi. (2016). Fuzzy Logic Based Control for Autonomous Mobile Robot Navigation. *Comput Intell Neurosci*. Pp. 1-10. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5027372/>

123. Anish Pandeya, Saroj Kumarb,, Krishna Kant Pandeya, Dayal R. Parhia. (2016). Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller. *Perspectives in Science Volume 8*, Pp. 421-423. <https://core.ac.uk/download/pdf/81931273.pdf>

124.. 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, – Ч. 1. – С. 46-52.

125. Santos, V. G.; Chaimowicz, L., (2014). “Cohesion and segregation in swarm navigation”. *Robotica*, 32(2), *Cambridge University Press*, pp. 209-223,. <http://www.viniciusgraciano.com/research/cohesion-segregation/>

126. 1MHz/200KHz Dual-frequency underwater distance ultrasonic sensor. Mode of access: URL: <http://www.globalmarket.com/product-info/1mhz-200khz-dual-frequency-underwater-distance-ultrasonic-sensor-1322001.html>

127. Distance Keeping for Underwater Vehicles – Tuning Kalman Filters Using Self-Oscillations
https://bib.irb.hr/datoteka/412520.Miskovic_et_al_OCEANS09_final_paper.pdf

128. Blintsov, O. (2017). Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle [Text] / O. Blintsov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – – Vol. 1, Issue 9. – P. 4–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93291

129. 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, 28-30 травня р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. С. 224-227.

130. 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. Ч. 1. – С. 36-44.

131. Мельничук А. С. (2013). Аналіз методів сортування масиву чисел / А. С. Мельничук, С. П. Луценко, Д. С. Громовий, К. В. Трофимова *Технологический аудит и резервы производства*. № 4(1). - С. 37-40. – Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2013_4-1_11

132. 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.*

133. MaxBotix Inc. (Copyright 2005 - 2014). MB1003 from the HRLV-MaxSonar-EZ. *Engineered and assembled in the USA.* pp. 1-15.
https://www.maxbotix.com/documents/HRLV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf

134. Катер на р/у Sea Ray New Bright (6785).
http://rozetka.com.ua/new_bright_35042/p664719/

135. Zhanna Yu. Burunina, Andrii M. Voityasyk, 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.

ДОДАТКИ

Додаток А

Документи, які підтверджують впровадження результатів

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ
ЦЕНТР КОРАБЛЕБУДУВАННЯ»

просп. Героїв України, 1-Е, м. Миколаїв, Україна, 54025
тел.: +38 (0512) 766 521, факс: +38 (0512) 766 520
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com
Код ЄДРПОУ 14307618



STATE CONCERN
"UKROBORONPROM"

STATE RESEARCH & DESIGN
SHIPBUILDING CENTRE

1-E Geroiv Ukrainy Ave., Mykolaiv, Ukraine, 54025
phone: +38 (0512) 766-521, fax: +38 (0512) 766 520
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com
Code 14307618

30.12.2020 № 01/928

на № _____ від _____

АКТ

використання результатів наукових досліджень дисертаційної роботи

Алоби Лео Тосина, представленої на здобуття

наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертаційне дослідження Алоби Л.Т. виконане у рамках НДР №2167 «Роботизовані технології захисту акваторії» (науковий керівник – д.т.н., професор Блінцов О.В., номер державної реєстрації 0118U000036D) і спрямоване на розробку систем автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом у складі групи підводних апаратів, що виконують спільну пошукову місію.

Основні результати дисертаційних досліджень, а саме: структура системи автоматичного керування окремим підводним апаратом на основі реалізації принципів адгезії, когезії та вирівнювання при його груповому русі, планується до використання в ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» при формуванні пропозицій щодо забезпечення ВМС ЗС України новими засобами морської робототехніки.

Директор – генеральний конструктор

Борисов В.Є.





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

54025, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс (+380512) 42-42-80 е-mail: university@nuos.edu.ua

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим документом засвідчуємо, що результати наукових досліджень викладача кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Алоби Лео Тосина, а саме - структура системи автоматичного керування рухом одиночного автономного ненаселеного підводного апарата (АНПА), яка містить нечіткий регулятор дистанції до навігаційно небезпечного сусіднього АНПА групи і нечіткий регулятор курсу власного АНПА для його безаварійного руху у складі групи – впроваджена у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при підготовці магістрів за освітньо-професійною програмою «Морська робототехніка» 141 спеціальності – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Форма впровадження – тематична лекція «Групове керування автономними ненаселеними підводними апаратами» навчальної дисципліни «Керування морськими рухомими об'єктами».

Проректор
з науково-педагогічної
роботи, професор



С.О. Слободян

Додаток Б
Основні залежності між системами координат та
кінематичні параметри АНПА

Б1. Системи координат та кінематичні параметри АНПА

Дослідження поступального руху АНПА зводиться до визначення руху його полюса. Для цього достатньо основної нерухомої системи координат. Обертний рух в загальному випадку може бути визначений в системі координат, по відношенню до якої відбувається рух тіла з однією нерухомою точкою. Для дослідження руху АНПА застосовують земну базову систему координат (БСК) та зв'язану систему координат (ЗСК) (рис. Б1).

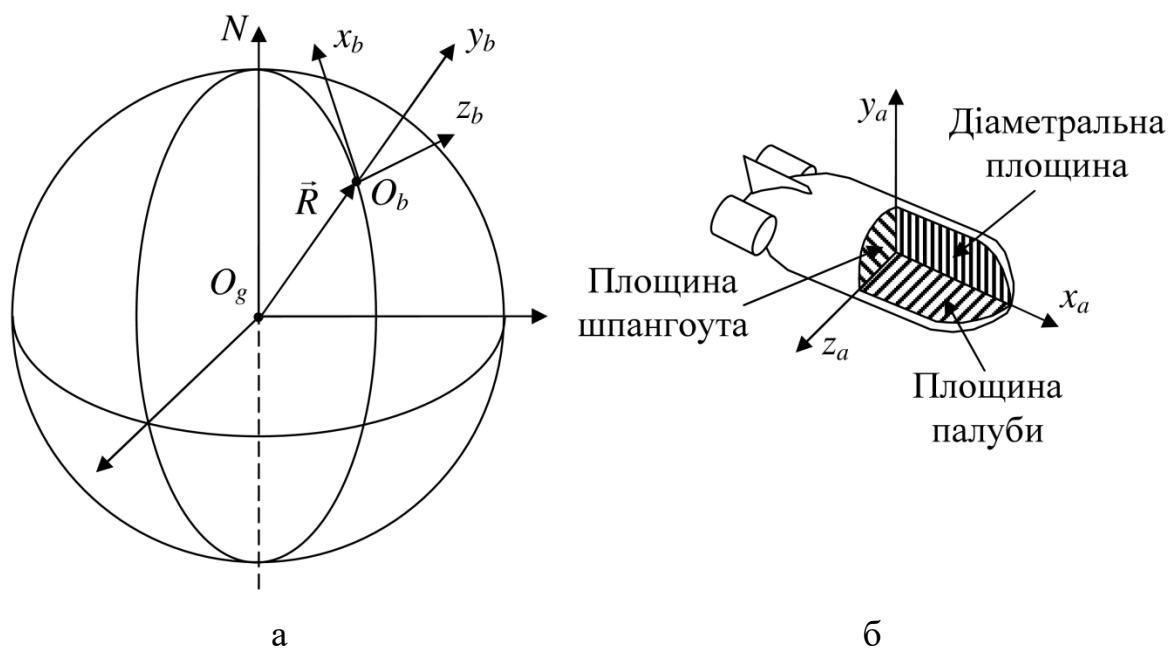


Рис. Б.1 – Системи координат:

а – земна базова; б – зв'язана з АНПА

Б1.1. Земна базова система координат

Оперативне керування рухом АНПА здійснюється в обмежених часових і просторових інтервалах в околі довільної точки криволінійної траєкторії руху. Тому розглядають переміщення АНПА відносно «плоскої і нерухомої» Землі – в БСК, яка є правою прямокутною системою координат $O_b x_b y_b z_b$ і орієнтована по основних напрямках на поверхні Землі (рис. Б.1, а). Приймається припущення про те, що БСК є інерціальною системою координат. Її початок O_b зв'язаний з деякою точкою на поверхні Землі. Вісь $O_b y_b$ є продовженням

радіуса-вектора \vec{R} , який з'єднує центр Землі O_g та точку O_b . Осі $O_b x_b$ та $O_b z_b$ лежать у площині горизонту, вісь $O_b x_b$ завжди спрямована на північ N , вісь $O_b z_b$ становить із першими двома осями праву прямокутну систему координат.

Б1.2. Зв'язана система координат

Рухома координатна система $O_a x_a y_a z_a$, повністю зв'язана з корпусом АНПА, переміщується й обертається разом з ним (рис. Б.1, б). Її центр сполучено з центром мас АНПА, а осі збігаються з головними центральними осями інерції АНПА. Поздовжня вісь $O_a x_a$ і нормальна вісь $O_a y_a$ лежать у поздовжній площині симетрії АНПА (діаметральній площині). Перша з них спрямована до носової частини, друга – вертикально вгору. Поперечна вісь $O_a z_a$ утворює з ними праву прямокутну координатну систему і разом з поздовжньою віссю $O_a x_a$ розташовується в горизонтальній площині (площини палуби), а разом з вертикальною віссю $O_a y_a$ – у поперечній площині АНПА (площини шпангоута)..

Систему координат можна зв'язати не тільки з корпусом підводного апарата, а також з окремими його елементами. Особливості обчислення сил та моментів гідродинамічних крил (ГК) потребують введення системи координат гідродинамічного крила (СКГК), яка повністю зв'язана з гідродинамічним крилом. Так, наприклад, якщо ГК поворотне, то разом з поворотом ГК буде змінюватись орієнтація СКГК по відношенню до ЗСК. Якщо ГК закріплене жорстко на корпусі АНПА, то орієнтація СКГК може або співпадати з ЗСК, або бути поверненою відносно ЗСК на константні кути. По суті вона не відрізняється від ЗСК за виключенням, того, що зв'язується з конкретним ГК. Для кожного ГК обирається власна СКГК.

Б1.3. Базиси систем координат

Якщо в деякому тривимірному векторному просторі \mathbf{R}^3 задано деякий вектор \vec{h} , то чисельні значення його координат залежатимуть від того, в проекціях на осі якої системи координат їх узято, тобто в якому базисі їх

подано. У зв'язку з цим вводяться поняття базисних векторів систем координат та базисів систем координат.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в БСК:

$$\hat{i}_b = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_b = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_b = \{0, 0, 1\},$$

вони є базисними векторами БСК, а базис $B = \{\hat{i}_b, \hat{j}_b, \hat{k}_b\}$ є базисом БСК векторного простору \mathbf{R}^3 .

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в ЗСК:

$$\hat{i}_a = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_a = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_a = \{0, 0, 1\},$$

вони є базисними векторами ЗСК, а базис $A = \{\hat{i}_a, \hat{j}_a, \hat{k}_a\}$ є базисом ЗСК векторного простору \mathbf{R}^3 .

Якщо задано деякий вектор \vec{h} , то при переході від одного базису векторного простору до іншого змінюються і його координати:

$$\vec{h} = \{x_b, y_b, z_b\}_B = \{x_a, y_a, z_a\}_A,$$

де x_b, y_b, z_b – проєкції вектора \vec{h} на відповідні осі БСК; x_a, y_a, z_a – проєкції вектора \vec{h} на відповідні осі ЗСК.

Індекси B, A показують, по відношенню до якого базису подано чисельні значення координат векторів.

Якщо відомі координати вектора \vec{h} в одному з базисів, то за допомогою рівнянь зв'язку можна знайти його координати в інших базисах за умови, що зв'язок між системами координат також відомий.

Б1.4. Кінематичні параметри АНПА

Рух АНПА досліджується як рух твердого тіла з шістьма ступенями свободи, серед яких виділяють три елементарних поступальних рухи та три елементарних обертових рухи, які в сукупності утворюють дванадцять кінематичних параметрів: шість позиційних та шість швидкісних.

Швидкісні кінематичні параметри є елементами векторів поступальної \vec{V} та обертової $\vec{\omega}$ швидкостей АНПА по відношенню до води. Якщо течія відсутня, то швидкість руху АНПА по відношенню до ґрунту дорівнює швидкості руху АНПА по відношенню до води. Зазвичай в якості елементів цих векторів беруть їх проєкції на осі ЗСК:

$$\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}_A; \quad \vec{\omega} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}_A.$$

Позиційні кінематичні параметри – поступальні та обертові координати АНПА – виражають по відношенню до БСК.

Поступальні координати представляють радіус-вектором \vec{r} , який з'єднує початок БСК та центр мас АНПА; обертові координати представляють вектор-рядком кутової орієнтації \vec{q} , елементами якого є кути Ейлера:

$$\vec{r} = \{x, y, z\}_B; \quad \vec{q} = \{\theta, \phi, \psi\}.$$

Кути Ейлера визначаються наступним чином.

- кут крену θ – кут між поздовжньою площиною симетрії (діаметральною площиною) АНПА $O_ax_ay_a$ і вертикальною площиною, яка містить вісь БСК O_by_b та поздовжню вісь ЗСК O_ax_a ;

- кут рискання ϕ – кут між проєкцією осі ЗСК O_ax_a на горизонтальну площину БСК $O_bx_bz_b$ та віссю O_bx_b ;

- кут диференту ψ – кут між віссю ЗСК O_ax_a і горизонтальною площиною БСК $O_bx_bz_b$.

Слід зазначити, що елементи вектор-рядка \bar{q} задаються кутами, а не проєкціями на осі БСК, тому індекс належності до базису B для чисельних значень кутів θ , φ , ψ не застосовується.

Б1.5. Рівняння зв'язку між системами координат при відомих координатах базисних векторів

Нехай координати базисних векторів базису A задано в базисі B :

$$\begin{aligned}\hat{i}_a &= \{i_x, i_y, i_z\}_B = i_x \hat{i}_b + i_y \hat{j}_b + i_z \hat{k}_b; \\ \hat{j}_a &= \{j_x, j_y, j_z\}_B = j_x \hat{i}_b + j_y \hat{j}_b + j_z \hat{k}_b; \\ \hat{k}_a &= \{k_x, k_y, k_z\}_B = k_x \hat{i}_b + k_y \hat{j}_b + k_z \hat{k}_b.\end{aligned}$$

Запишемо ці рівняння в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \hat{j}_a \\ \hat{k}_a \end{bmatrix} = K_{AB}^T \begin{bmatrix} \hat{i}_b \\ \hat{j}_b \\ \hat{k}_b \end{bmatrix}; \quad K_{AB}^T = \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \\ j_x & j_y & j_z \\ k_x & k_y & k_z \end{bmatrix}.$$

де K_{AB} – матриця координат базисних векторів базису A , заданих в базисі B , або матриця зв'язку між ЗСК та БСК.

Верхній індекс T позначає операцію транспонування матриці.

Використовуючи матрицю K_{AB} , запишемо наступні співвідношення для координат вектора \vec{h} :

$$\vec{h} = \begin{bmatrix} x_b & y_b & z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_b \\ \hat{j}_b \\ \hat{k}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a & y_a & z_a \end{bmatrix} K_{AB}^T \begin{bmatrix} \hat{i}_b \\ \hat{j}_b \\ \hat{k}_b \end{bmatrix}.$$

Матриці, які містять базисні вектори базису B , скорочуються і ми отримуємо рівняння зв'язку між БСК та ЗСК в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = K_{AB} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = K_{AB}^{-1} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}.$$

Оскільки базисні вектори двох систем координат (наприклад БСК та ЗСК) є одиничними ортогональними векторами, то матрицю, інверсну до матриці зв'язку між цими системами координат, можна знайти шляхом застосування до останньої операції транспонування:

$$K_{BA} = K_{AB}^{-1} = K_{AB}^T.$$

Тому рівняння зв'язку між БСК та ЗСК можна переписати в наступному виді:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = K_{AB} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = K_{AB}^T \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}.$$

Процес математичного моделювання АНПА передбачає перетворення координат векторів, які застосовуються в математичних моделях його елементів, між базисами систем координат на кожній обчислювальній ітерації. Ортогональність матриці зв'язку дає змогу замість операції інвертування матриць зв'язку застосовувати операції їх транспонування. Це суттєво зменшує необхідні обчислювальні ресурси при моделюванні динаміки АНПА.

Рівняння зв'язку справедливі не тільки для БСК та ЗСК, а також і для будь-яких інших систем координат, для яких відомі координати базисних векторів однієї системи по відношенню до іншої.

Б1.6. Рівняння зв'язку при відомих кутах Ейлера

Кути Ейлера визначають орієнтацію ЗСК по відношенню до БСК. Елементи матриці зв'язку між ЗСК та БСК K_{AB} можна виразити через координати базисних векторів базису A , заданих в базисі B , а також через кути Ейлера шляхом послідовного повороту ЗСК навколо осей БСК::

$$K_{AB} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}$$

Переведення координат будь-якого вектора між базисами A та B виконується на основі рівнянь.

Б1.7. Рівняння зв'язку кінематичних параметрів обертового руху АНПА

Три послідовних оберти проти годинникової стрілки навколо вертикальної, поперечної та поздовжньої осей на кути відповідно φ , ψ та θ переводять ЗСК з початкового стану, коли вона сполучена з БСК, через проміжні стани в деяке довільне положення, яке визначає орієнтацію АНПА в поточний момент часу.

Кути Ейлера мають додатні значення при наступних умовах:

- $\varphi > 0$ при повороті діаметральної площини АНПА на лівий борт відносно заданого напрямку руху $O_b x_b$;
- $\psi > 0$ при диференті на корму;
- $\theta > 0$ при крені на правий борт.

Зв'язок кутів Ейлера з вектором кутової швидкості АНПА $\vec{\omega} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}_A$ (заданим в проєкціях на осі ЗСК), встановлюється на основі кінематичних співвідношень, які називають рівняннями зв'язку обертового руху:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{bmatrix} = K_{\omega} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}; \quad K_{\omega}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

де K_{ω} – кінематична матриця зв'язку обертового руху.

Рівняння дає змогу розраховувати позиційні обертові кінематичні параметри АНПА в БСК, тобто кути Ейлера, на основі швидкісних кінематичних параметрів обертового руху АНПА $\vec{\omega}$, поданих в ЗСК.

Додаток В

Програма і методика проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
 НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
 ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор по НР



В.С. Блінцов

« 12 » 09 2018 р.

М.П.

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ
 ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ
 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ
 НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЯК АГЕНТОМ
 ГРУПИ
 УКФА.361192.005 ПМ

Начальник НДЧ

О.І. Савенков

Начальник БС і М

В.В. Мацкевич

Миколаїв

2018 р.

ЗМІСТ

1 Підстави для проведення випробувань	4
2 Об'єкт випробувань	4
3 Мета випробувань	4
4 Організація проведення випробувань	5
4.1 Загальні положення	5
4.2 Місце й тривалість випробувань	6
4.3 Обсяг випробувань	7
4.4 Звітність	7
5 Порядок і умови проведення натурних випробувань	7
6. Метрологічне забезпечення випробувань	8
7 Програма випробувань	8
8 Методики випробувань	9
8.1 Визначення вихідних даних для проведення випробувань	9
8.2 Методика випробування САК АНПА в режимі адгезії	10
8.3 Методика випробування САК АНПА в режимі когезії	11
8.4 Методика випробування працездатності регулятора дистанції при впливі на АНПА зовнішніх збурювань	11
8.5 Методика випробування для визначення динамічних властивостей САК	12
Література	13
Додатки	14
Додаток А. УКФА.361192.005 ПМ. Протоколи натурних випробувань	15
Додаток Б. Зауваження та пропозиції за результатами натурних випробувань макета	16

АНОТАЦІЯ

Дана програма й методика розроблена в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК ім. адмірала Макарова) у рамках НДР №2167 «Роботизовані технології захисту акваторії», номер державної реєстрації 0118U000036D.

Натурні випробування інтелектуальної САК узгодженим рухом АНПА виконувалися відповідно до вимог «Програма та методика морських дослідницьких випробувань інтелектуальної САК АНПА як агентом групи» і ДЕРЖСТАНДАРТ 24.026-80.

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

Підставою для проведення випробувань є перевірка працездатності інтелектуальної системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як агентом групи

2 ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

Випробуванням піддається телекерований ненаселений підводний апарат (ТНПА проекту "Гідрограф"), оснащений системою сенсорів зовнішнього середовища (СЗС) виробництва НУК ім. адм. Макарова, а також радіокерований катер (РУК).

Состав комплексу встаткування, що підлягає випробуванням:

- ТНПА легкого класу;
- пост енергетики й керування (ПЕК);
- кабель-трос;
- кабельної лебідки (КЛ);
- радіокерований катер (РУК)
- пульт для керування РУК
- СЗС.

3 МЕТА ВИПРОБУВАНЬ

Натурні випробування інтелектуальної САК узгодженим рухом АНПА виконувалися відповідно до «Програми та методики морських дослідницьких випробувань інтелектуальної САК АНПА» і ДЕРЖСТАНДАРТ 24.026-80 у морській лабораторії НУК "Дельта" (борт науково-дослідного судна «Дельта») на Бузькому лимані, місто Миколаїв, Україна в 2018 році

Метою проведених по даній програмі й методиці випробувань є експериментальна перевірка функціональної працездатності певного режиму роботи інтелектуальної системи автоматичного керування узгодженим рухом автономного ненаселеного підводного апарата як агента групи, зокрема реалізації алгоритмів адгезії й когезії.

Завданнями випробувань є послідовне виконання етапів перевірки згідно зі даною Програмою й методикою випробувань.

Основні технічні характеристики обладнання наведені в табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	Найменування	Параметр
Гідрограф		
1	Розміри ТНПА, мм:	
	– довжина	1220
	– ширина	600
	– висота	540
2	Маса ТНПА, кг:	97
3	Кабель-трос: (ПК РУК)	
	– максимальна довжина, м	250
	– зовнішній діаметр, не більше, мм	10
	поздовжні стаціонарні зусилля:	
	– не менше, кН	4,392
РУК		
1	Розміри РУК, мм:	
	– довжина	750
	– ширина	200
	– висота	250
2	Маса, кг:	1,45

4 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

4.1 Загальні положення

4.1.1 Дана «Програма та методика» поширюється на комплекс «Гідрограф».

4.1.2 Випробування необхідно проводити з борту надводного судна. Пост керування розташовується на борту надводного судна.

4.1.3 Випробування проводяться в морській лабораторії НУК "Дельта" (борт науково-дослідного судна «Дельта») на Бузькому лимані Чорного моря, місто Миколаїв, Україна в 2017 році

4.1.4 Випробування проводяться комісією, призначеною наказом керівника підприємства-виконавця.

4.1.5 Випробування можуть бути перервані або припинені у випадку:

- невідповідності випробовуваного зразка основним вимогам ТЗ;

- виходу з ладу випробовуваного зразка.

Припинення випробувань оформляється актом.

4.1.6 Оцінка результатів випробувань повинна містити конкретні й точні формулювання, що забезпечують їхнє однозначне розуміння, із зазначенням, при негативних результатах випробувань, невиконаних вимог контракту, шляхів усунення й порядку перевірки усунення виявлених дефектів.

4.1.7 Технічне керівництво випробуваннями здійснює головний конструктор виробу «Гідрограф» або співробітник підприємства-виконавця, призначений наказом по підприємству.

4.1.8 В процесі підготовки та проведення випробувань дана «Програма та методика» може уточнюватися й доповнюватися.

4.2 Місце й тривалість випробувань

Місце проведення випробувань – у морській лабораторії НУК "Дельта" (борт науково-дослідного судна «Дельта») на Бузькому лимані, місто Миколаїв, Україна в 2018 році.

4.3 Обсяг випробувань

Експериментальне дослідження регулятора дистанції почнемо з перевірки режиму адгезії, а потім режиму когезії. Підтвердження працездатності САК АНПА при впливові на його корпус зовнішніх збурювань.

Досліджуються динамічні властивості САК АНПА шляхом завдання сигналу керування, що змінюється за синусоїдальним законом.

4.4 Звітність

4.4.1 Результати випробувань оформляються у вигляді протоколів.

4.4.2 Протокол випробувань затверджується головою комісії.

4.4.3 За результатами випробувань, на підставі протоколу, складається акт.

4.4.4 Зауваження та пропозиції за результатами випробувань оформляються згідно з таблицею.

5 ПОРЯДОК І УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

5.1 Перед кожним видом випробувань проводити зовнішній огляд і перевірку працездатності в нормальних кліматичних умовах.

5.2 Нормальні кліматичні умови характеризуються комбінацією наступних параметрів атмосфери:

- температура від $+5^{\circ}\text{C}$ до 35°C ;
- відносна вологість повітря від 45 до 85 %;
- атмосферний тиск від 84 до 107 кПа (від 630 до 800 мм рт. ст.).

5.3 Випробування проводити при:

- хвилюванні водної поверхні – до 3-х балів;
- швидкості руху – від 0,2 до 2 м/с.

5.4 При випробуваннях застосовувати стандартизовані засоби виміру та обладнання, згідно переліку.

5.5 Не стандартизована вимірювальна апаратура та обладнання, згідно переліку повинні бути атестовані.

5.6 До випробувань допускається персонал, що навчився роботі з апаратурою, випробним обладнанням.

5.7 Вимоги по безпеці в процесі проведення випробувань повинні бути спрямовані на виключення уражень і травм обслуговуючого персоналу, а також з урахуванням вимог безпечної експлуатації надводних і підводних технічних засобів.

6 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

6.1 Перелік засобів вимірів, що забезпечують необхідну точність вимірювань, повинен бути погоджений з метрологічною службою підприємства-виконавця.

6.2 При проведенні випробувань застосовувати атестовані засоби вимірів, передбачені в методиках випробувань даної «Програми та методики», що мають достатній термін до проведення чергової атестації.

7 ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

Працездатність інтелектуальної системи автоматичного керування (САК) АНПА як агентом групи перевіряється шляхом одержання та аналізу залежності віддалення макета від РУК $l(t)$ у режимах адгезії (віддалення макета від РУК, що наближається), когезії (наближення макета до РУК, що віддаляється від нього) і погодженого руху макета й РУК. Натурний експеримент ділиться на наступні етапи:

7.1 Перевірка працездатності САК АНПА в режимі адгезії;

7.2 Перевірка працездатності САК АНПА в режимі когезії;

7.3 Перевірка працездатності регулятора дистанції при впливі на АНПА зовнішніх збурювань;

7.4 Визначення динамічних властивостей САК АНПА.

Відстань між макетом і РУК вимірюється групою сенсорів дистанції, що входять у комплект системи СЗС.

Кут курсу вимірюється сенсорами навігаційної системи макета.

8 МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ

8.1 Визначення вихідних даних для проведення експерименту

8.1.1 Визначення констант

Сенсори системи СЗС макета можуть вимірювати дистанцію в діапазоні $l = [0,3; 5]$ м. У зв'язку із цим запровадимо наступні константи:

- радіус небезпечної зони $rdanger = 1$ м;
- радіус зони погодженого руху $rtrack = 3$ м;
- радіус зони втрати $rmiss = 4$ м.

Якщо РУК стосовно макета перебуває в небезпечній зоні ($l \leq rdanger$), САК повинна переходити в режим адгезії, тобто макет повинен віддалятися від РУК. РУК стосовно макета перебуває в зоні віддалення ($l \geq rmiss$), САК повинна переходити в режим руху заданим курсом. Якщо $rtrack \leq l \leq rmiss$, САК повинна переходити в режим когезії, тобто апарат повинен зближатися з РУК. Якщо ж $rdanger \leq l \leq rtrack$, САК повинна перейти в режим узгодженого руху макета й РУК.

8.1.2 Визначення задачі керування для випробування САК в динамічному режимі

Задачу керування для випробування по визначенню динамічних властивостей САК АНПА необхідно формувати за наступним законом:

$$l_s(t) = l_s(0) + \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right),$$

де $l_s(0)$ – початкове значення задачі керування, T – період зміни задачі керування, t – час.

8.2 Методика випробування САК АНПА в режимі адгезії

8.2.1 В режимі ручного керування вивести макет і РУК у початкове положення, забезпечивши виконання умови $l \leq rdanger$.

8.2.2 На посту керування макетом увімкнути режим запису показань сенсорів системи СЗС.

8.2.3 Перевести САК макета в режим автоматичного керування. За допомогою пульта керування перевести РУК у режим маршового ходу вперед.

8.2.4 За показниками сенсорів системи СЗС, а також візуальним спостереженням переконатися, що макет віддаляється від РУК.

8.2.5 Дочекатися завершення перехідного процесу.

8.2.6 Перевести САК макета в режим ручного керування й зупинити рух РУК.

8.2.7 Вимкнути запис показань системи СЗС.

8.2.8 Якщо не виконані умови п. 8.2.4 даної методики або робота регулятора дистанції не задовольняє заданим критеріям якості, змінити налаштування регулятора й повторити пп. 8.2.1 – 8.2.7 даної методики. А якщо ні, то перейти до п. 8.2.9 методики.

8.2.9 Результати випробування занести до протоколу.

8.3 Методика випробування САК АНПА в режимі когезії

8.3.1 В режимі ручного керування вивести макет і РУК у початкове положення, забезпечивши виконання умови $rtrack \leq l \leq rmiss$.

8.3.2 На посту керування макетом увімкнути режим запису показань сенсорів системи СЗС.

8.3.3 Перевести САК макета в режим автоматичного керування. За допомогою пульта керування перевести РУК у режим маршового ходу вперед.

8.3.4 За показниками сенсорів системи СЗС, а також візуальним спостереженням переконатися, що макет наближається до РУК.

8.3.5 Дочекатися завершення перехідного процесу.

8.3.6 Перевести САК макета в режим ручного керування й зупинити рух РУК.

8.3.7 Вимкнути запис показань системи СЗС.

8.3.8 Якщо не виконані умови п. 8.3.4 даної методики або робота регулятора дистанції не задовольняє заданим критеріям якості, змінити налаштування регулятора й повторити пп. 8.3.1 – 8.3.7 даної методики. А якщо ні, то перейти до п. 8.3.9 методики.

8.3.9 Результати випробування занести до протоколу.

8.4 Методика випробування працездатності регулятора дистанції при впливові на АНПА зовнішніх збурювань

Для забезпечення можливості створення зовнішнього збурювання і його повторюваності в даному випробуванні макет буде здійснювати рух уздовж борту надводного судна на заданій відстані l_s . Випробування регулятора дистанції необхідно проводити по наступному алгоритму:

8.4.1 В режимі ручного керування вивести макет у початкове положення, забезпечивши виконання умови $l > l_s$.

8.4.2 На посту керування макетом увімкнути режим запису показань сенсорів системи СЗС.

8.4.3 Перевести САК макета в режим автоматичного керування.

8.4.4 Дочекатися завершення перехідного процесу, після чого прикласти до корпусу макета вплив, що збурює.

8.4.5. Дочекатися завершення перехідного процесу.

8.4.6 Перевести САК макета в режим ручного керування.

8.4.7 Вимкнути запис показань системи СЗС.

8.4.8 Результати випробування занести до протоколу.

8.5 Методика випробування для визначення динамічних властивостей САК

У випадку динамічної зміни значення заданої дистанції необхідно забезпечити строго прямолінійний рух РУК. Відхилення РУК від прямолінійної траєкторії руху приведе до зниження точності вимірів. Тому при випробуванні по визначенню динамічної точності САК в якості сусіднього АНПА також будемо використовувати борт надводного судна.

8.5.1 За допомогою апаратно-програмного забезпечення поста керування сформувані задачі керування для САК.

8.5.2 В режимі ручного керування вивести макет у початкове положення, забезпечивши виконання умови $l \neq l_s(0)$.

8.5.3 На посту керування макетом увімкнути режим запису показань сенсорів системи СЗС.

8.5.4 Перевести САК макета в режим автоматичного керування.

8.5.5 Очікувати час $td \geq T$.

8.5.6 Перевести САК макета в режим ручного керування.

8.5.7 Вимкнути запис показань системи СЗС.

8.5.8 Результати випробування занести до протоколу.

Д О Д А Т К И

до «Програми та методики проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як агентом групи», УКФА.361192.005 ПМ

Додаток А

УКФА.361192.005 ПМ. Протоколи натурних випробувань

ЗАТВЕРДЖУЮ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор по НР

НУК ім. адм. Макарова

_____ В.С. Блінцов

«____» _____ 20 г.

«____» _____ 20 г.

М.П.

М.П.

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ

(об'єкт випробувань)

(місце проведення випробувань)

(дата проведення випробувань)

Об'єкт випробувань:Мета випробувань:Обладнання, пристосування та умови проведення випробувань:Результати випробувань:

№ пункту про-ми	Найменування випробувань	Результат (відповідає/не відповідає)	Примітка
1	2	3	4

Висновки:

Представник Замовника

Науковий керівник теми

«__» _____ 20 г.

«__» _____ 20 г.

Представник Замовника

Головний метролог

НУК ім. адм. Макарова

«__» _____ 20 г.

«__» _____ 20 г.

Додаток Б.

Зауваження та пропозиції за результатами натурних випробувань макета

Номер п. ПМ	Зауваження та пропозиції	Ухвалене рішення
1	2	3

Додаток Г

Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів 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.** Synthesis of Intelligent Automatic Control System of an Autonomous Underwater Vehicle as a Group Agent. (2019). // [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. DOI: [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 веденим автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи. / В. С. Блінцов, **Л. Т. Алоба** // *Збірник наукових праць НУК*. № 4(482). P. 89-97. **Фахове видання**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. 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.

2. 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.

3. **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.*

4. **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.

5. 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.

6. **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.*

7. **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.

8. **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

1. 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

2. **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

3. 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