

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

Монографія

*За редакцією
доктора технічних наук, професора В. С. Блінцова*

Миколаїв
«Іліон»
2022

УДК 681.5:629.584
О-75

Рецензенти: професор кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, д.т.н., професор **Б.М. Гордєєв**, професор кафедри систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д.т.н., професор **О.В. Збруцький**.

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова (протокол № ____ від _____ року)*

Основи автоматичного керування групою автономних
О-75 ненаселених підводних апаратів : монографія / В. С. Блінцов,
Л. Т. Алоба, А. В. Надточий, В. А. Надточій ; за ред. В. С. Блінцова. —
Миколаїв : Іліон, 2022. — 147 с.

ISBN 978-617-534-681-5

У монографії викладено загальні відомості про автономні ненаселені підводні апарати, які призначені для групового застосування при виконанні спільних підводних місій пошукового та природоохоронного спрямування. Наведено відомості про способи організації керування групою апаратів та методи дослідження їх систем автоматичного керування.

Розглянуті задачі автоматизації керування безекіпажним надводним судном як носієм групи автономних ненаселених підводних апаратів.

Для наукових співробітників, спеціалістів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів, які досліджують, проектують та вивчають засоби підводної робототехніки.

УДК 681.5:629.584

ISBN 978-617-534-681-5

© Блінцов В. С., Алоба Л. Т.,
Надточий А. В., Надточій В. А., 2022

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АНПА	— автономний ненаселений підводний апарат
БКК	— бортовий керуючий контролер
БНС	— безекіпажне надводне судно
ВМ	— виконавчий механізм
ГЕД	— гребний електричний двигун
ГГ	— гребний гвинт
ЕКНІС	— електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система
ЗК	— зовнішній корпус підводного апарата
ЗСК	— зв'язана з корпусом підводного апарата система координат
ІНЗ	— ідентифікатор навігаційних загроз
ІСОН	— інтегрована система орієнтації і навігації
КВ	— корисний вантаж
МБК	— морський безекіпажний комплекс
ММ	— математична модель
МНО	— модель навігаційної обстановки
ПСАК	— підсистема автоматичного керування
РГАБ	— радіогідроакустичний буй
РКК	— радіокерований катер
РСК	— рушійно-стерновий комплекс
САК	— система автоматичного керування
СНО	— сенсор навігаційної обстановки
ЦКК	— центр керування та контролю

ВСТУП

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 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.

Монографія містить результати роботи наукової школи «Підводна техніка» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова у напрямку розробки систем автоматичного керування одиночним автономним підводним апаратом як «агентом» групи, який функціонує у складі групи АНПА.

Синтезовані структури, алгоритми та математичні моделі систем автоматичного керування одиночним АНПА дають змогу організувати безпечний його рух у складі групи підводних апаратів, що виконують спільну підводну операцію.

Надано опис морського натурного експерименту та наведено основні його результати, які підтверджують працездатність синтезованих систем автоматичного керування рухом одиночного АНПА, який рухається в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів групи.

Виконано огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв АНПА, розглянуто деякі задачі автоматизації керування безекіпажним надводним судном як носієм групи автономних ненаселених підводних апаратів.

1 СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ

1.1 Загальна характеристика автономних ненаселених підводних апаратів, призначених для групового використання

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, підводна археологія, 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].

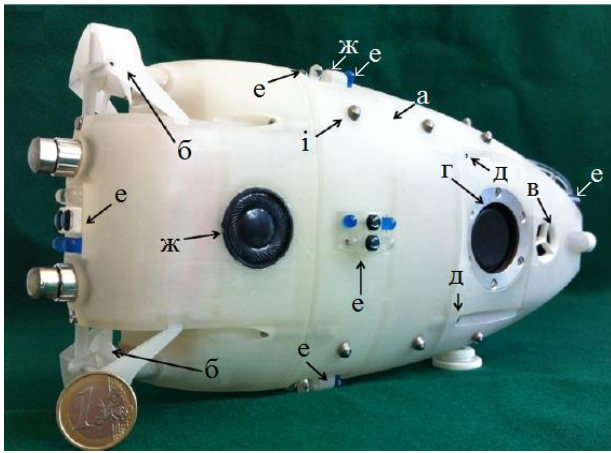
На рис. 1.1 наведено приклади малогабаритних АНПА, призначених для виконання вказаних підводних робіт у режимі групового застосування.

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

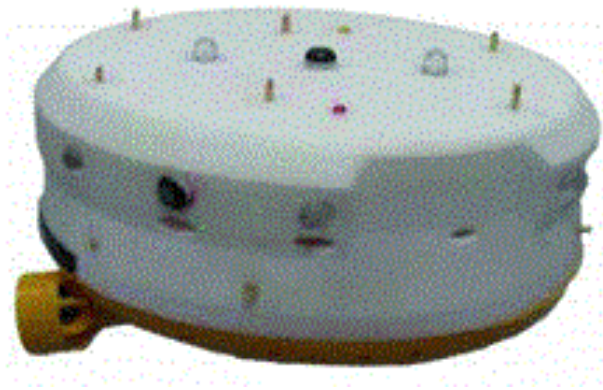
Проект “The Jeff Plattform” являє собою мікро-АНПА, який спеціально спроектовано для групового застосування з метою проведення масштабних екологічних досліджень водного середовища [13]. На рис. 1.1,а показано основні конструктивні елементи АНПА: а – зовнішній корпус (гідродинамічний обтікач); б – кормові 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].



a



б



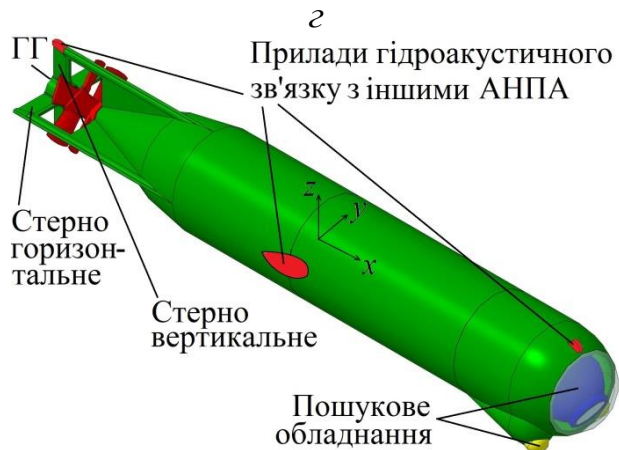
в



г



д



е

Рисунок 1.1 – Сучасні малогабаритні АНПА, призначені для виконання підводних робіт у режимі групового застосування: *a* – “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)

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 роботі 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 мікроманіпуляцій).

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.

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 місій (наприклад, пошукових операцій).

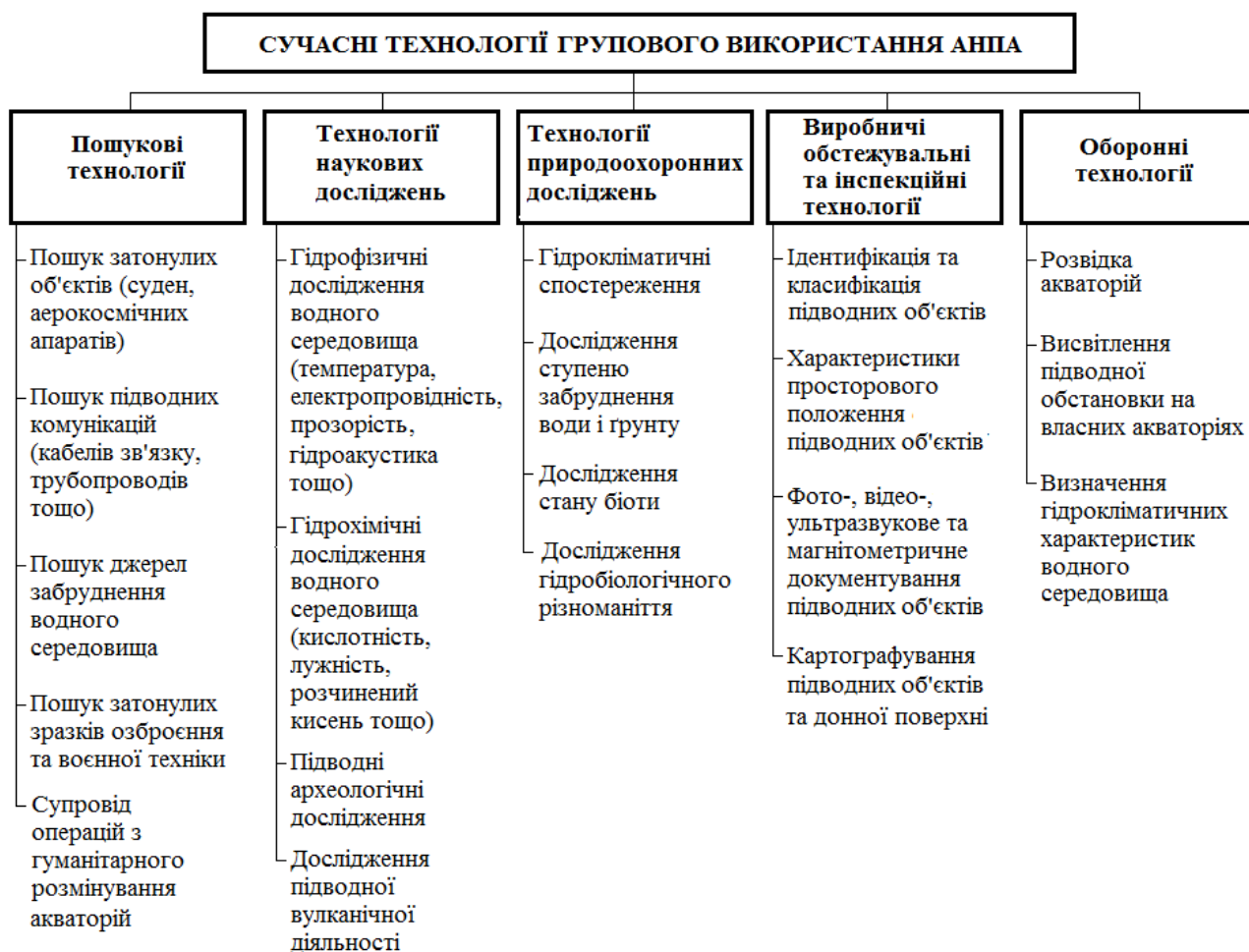


Рисунок 1.2 – Основні методи групового використання АНПА

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

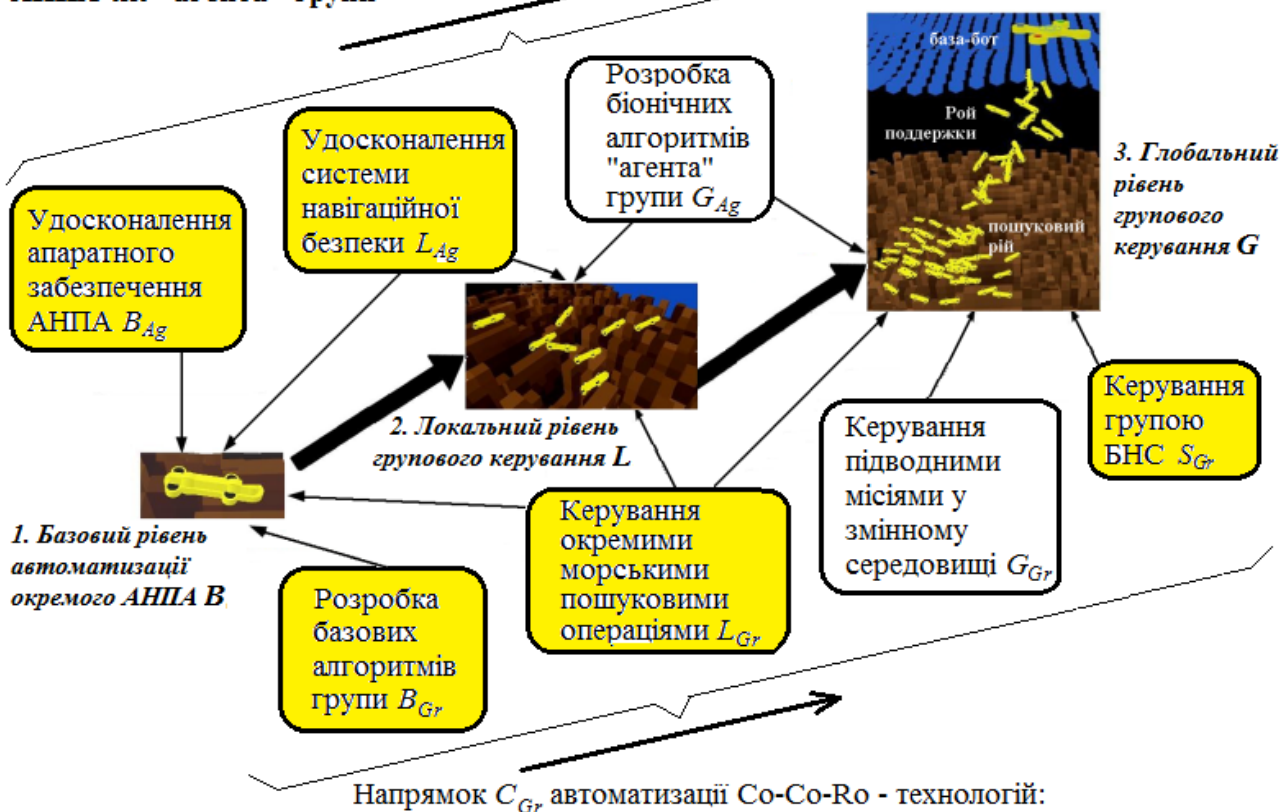
Розглянемо їх більш детально.

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 рушійно-стерновими комплексами (РСК), мають відповідні системи автоматичного забезпечення заданої плавучості тощо.

Крім того, тут мають розроблятися технології автоматичного випуску групи АНПА з надводного безекіпажного судна-носія (БНС) на початку місії та їх автоматичний прийом на борт БНС після завершення місії

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

"Розвиток індивідуальних характеристик АНПА як "агента" групи"



"Розвиток технологій групового керування АНПА"

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

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 мають задачі автоматизації B_{Ag} та L_{Ag} , оскільки успішний їх розв'язок має забезпечити автоматичний випуск АНПА та їх прийом на борт БНС, а також підвищити безпеку просторового руху АНПА у складі групи. Тому у подальшому в роботі розв'язуються задачі автоматизації B_{Ag} та L_{Ag} (на рис. 1.3. виділені 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 автоматичного керування групою АНПА з умовах змінного середовища G_{Gr} (дії зовнішніх збурень природного чи антропогенного походження);

- розробку базових алгоритмів автоматичного керування безекіпажними надводними суднами (БНС), які забезпечують доставку груп АНПА у задану точку акваторії, випуск групи АНПА на початку місії та їх прийом на борт БНС після завершення місії, а також повернення БНС у порт призначення S_{Gr} .

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

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

Для сучасного етапу розвитку вітчизняної підводної робототехніки до першочергових задач автоматизації групового керування АНПА слід віднести задачі B_{Gr} , L_G та S_{Gr} , 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 дослідженнях за напрямком C_{Gr} розглядаються задачі B_{Gr} , L_{Gr} та S_{Gr} .

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 окремих «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 окремих «агент» має мінімальний інформаційний зв'язок з іншими АНПА, необхідний для виконання місії (наприклад, для коригування поточної операції підводної місії); одночасно кожний окремих «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 окремих «агент» виконує індивідуальну задачу, яка може бути змінена під час місії; окремих «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.

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.



Рисунок 1.4 – Напрямки реалізації методів групового використання 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 гідохімічних параметрів води.

Розв'язок задачі P_{Gr-P} 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-P} . Тут важливою складовою задачі керування є забезпечення заданої програмою P_{Gr-P} просторової конфігурації групи АНПА, що має гарантувати якісне і своєчасне виконання підводної місії.

Задача $A_{АНПА-М}$ 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 $P_{Гр-П}$.

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 $P_{Гр-П}$, локалізація завдань керування $A_{Гр-М}$, організація їх групового узгодженого руху $A_{АНПА-М}$. 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] пропонується класифікація 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).

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 (центрального 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.



Рисунок 1.5 – Способи організації 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 поведженні 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 поведження 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 керування та прийняття рішень, та на принцип функціональної декомпозиції (розбиття задачі на підзадачі). Пропонується набір базових службових алгоритмів колективної поведінки АНПА, який складається з двох частин: «управлінської» (A1) та «функціональної» (A2):

- A1-1: самовиявлення колективу АНПА;
- A1-2: самоіменування колективу АНПА;
- A1-3: самоузгодження колективу АНПА;
- A2-1: самоорганізація колективу АНПА у просторі;
- A2-2: самоорганізація колективу АНПА у часі;
- A2-3: самоорганізація колективу АНПА за параметром.

Запропонований 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 вискоєфективних 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 (одиначних 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 загрозливо 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 одиначний АНПА чи група апаратів;

- рівень самодіагностики АНПА як одиначно 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 одиначним 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 даній 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.

Запропонована 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, запропонована 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 керування групою АНПА: метод віртуальної структури, метод на основі поведінки, метод «лідер-послідовник» та метод штучного потенціалу поля. Також у роботі проаналізовано особливості та труднощі керування 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 організовувати 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 (безекіпажних 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).

Отримані єврокомандою науковців результати підтвердили працездатність концепції групового використання АНПА та надводних безекіпажних 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

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.

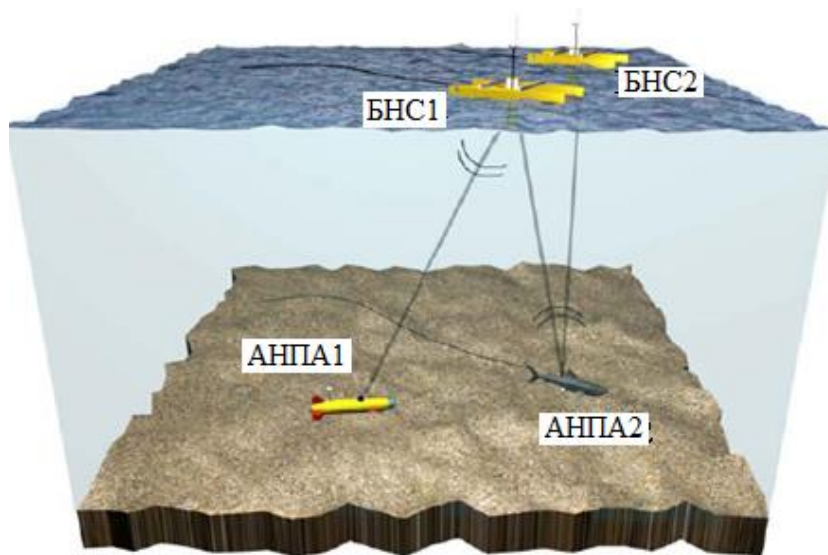


Рисунок 1.6 – Робототехнічні складові проекту Євросоюзу “GREX”

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 відкрис можливість промислового використання групових технологій використання АНПА, пов'язані з розробкою вискоєфективних систем автоматичного керування групою АНПА та окремими АНПА як «агентами» групи.

Тому у 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.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

2.1 Попередні зауваження

Для успішного розв'язання сформульованих задач 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 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 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 роботі 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_c (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_{zz} , які діють на ЗК АНПА – хвильова і вітрова дія (при поверхневому русі АНПА), течія.

При розробці математичних моделей елементів АНПА у 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 рушія 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 роботі 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 системами координат та кінематичні параметри АНПА наведено у Додатку А.

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]:

$$\frac{d_A V}{dt} = I^{-1}(T - KIV); \quad \frac{d_B R}{dt} = K_V(V + V_s), \quad (2.1)$$

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 обертального 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:

$$V = [\vec{v} \quad \vec{\omega}]^T = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T; \quad (2.2)$$

$$R = [\vec{r} \quad \vec{q}]^T = [x \quad y \quad z \quad \theta \quad \varphi \quad \psi]^T; \quad (2.3)$$

$$I = M + \Lambda; \quad (2.4)$$

$$M = \text{diag}\{m, m, m, J_x, J_y, J_z\}; \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{61} & \cdots & \lambda_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.5)$$

$$T = [\vec{F} \quad \vec{M}]^T = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T; \quad (2.6)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_z & v_y & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_z & 0 & -v_x & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -v_y & v_x & 0 & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.7)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix}; \quad (2.8)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \\ j_x & j_y & j_z \\ k_x & k_y & k_z \end{bmatrix}^T; \quad (2.9)$$

$$K_\omega = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1}; \quad (2.10)$$

$$V_s = [\vec{v}_s \quad 0_{1 \times 3}]^T = [v_{sx} \quad v_{sy} \quad v_{sz} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad (2.11)$$

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 оберткової 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; $\vec{v}_s$ – вектор швидкості течії по відношенню до БСК; v_{sx}, v_{sy}, v_{sz} – проєкції вектора $\vec{v}_s$ 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]:

$$T_h = \begin{bmatrix} \vec{F}_h & \vec{M}_h \end{bmatrix}^T = D(V)V, \quad (2.12)$$

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]:

$$D(V) = -\left(\text{diag}\{a_l, b_l, c_l, p_l, q_l, r_l\} + \text{diag}\{a_q|v_x|, b_q|v_y|, c_q|v_z|, p_q|\omega_x|, q_q|\omega_y|, r_q|\omega_z|\} \right), \quad (2.13)$$

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:

$$\vec{F}_g = mg\vec{e}, \quad (2.14)$$

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:

$$T_g = \begin{bmatrix} \vec{F}_g & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}^T. \quad (2.15)$$

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

$$\vec{F}_b = -\rho\Omega g\vec{e}. \quad (2.16)$$

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

$$\vec{M}_b = \vec{r}_b \times \vec{F}_b, \quad (2.17)$$

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 $\vec{M}_b$:

$$T_b = \begin{bmatrix} \vec{F}_b & \vec{M}_b \end{bmatrix}^T. \quad (2.18)$$

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:

$$T_{gb} = \begin{bmatrix} \vec{F}_g + \vec{F}_b & \vec{M}_b \end{bmatrix}^T. \quad (2.19)$$

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 роботі 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:

$$T_{PC} = \begin{bmatrix} F_{ГГ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

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 $K_{ЕД}$:

$$J_p \frac{d\omega_{ГГ}}{dt} = K_{ЕД} u - Q_{ГГ}; \quad (2.21)$$

$$Q_{ГГ} = \begin{cases} \frac{K_q \rho D^5}{4\pi^2} \omega_{ГГ}^2, & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_q \rho D^3 v_{ГГ}^2, & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (2.22)$$

$$F_{\Gamma\Gamma} = \begin{cases} \frac{K_F \rho D^4}{4\pi^2} \omega_{\Gamma\Gamma}^2, & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_f \rho D^2 v_{\Gamma\Gamma}^2, & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (2.23)$$

$$J = \frac{2\pi v_p}{\omega_{\Gamma\Gamma} D}, \quad (2.24)$$

де: u – керуючий сигнал регулятора ЕД; $\omega_{\Gamma\Gamma}$ – кутова швидкість обертання ГГ; J_p – сумарний момент інерції системи "ЕД – РВ – ГГ", приведений до ГГ; $Q_{\Gamma\Gamma}$ – гальмівний момент ГГ; $F_{\Gamma\Gamma}$ – 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 – проєкція 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 , $\omega_{\Gamma\Gamma}$ та $v_{\Gamma\Gamma}$ [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].

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 аплікат утворює з першими двома праву прямокутну систему координат.

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

$$\vec{F}_w = \{F_{wx}, F_{wy}\}_W; \quad (2.25)$$

$$\vec{v}_w = \{v_{wx}, v_{wy}\}_W; \quad (2.26)$$

$$F_{wx} = -0,5C_x(\alpha)\rho v_{wx}^2 S; \quad (2.27)$$

$$F_{wy} = -0,5C_y(\alpha)\rho v_{wx}^2 S, \quad (2.28)$$

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

$$\vec{M}_w = \vec{r}_w \times \vec{F}_w, \quad (2.29)$$

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 оберткової $\vec{\omega}$ швидкостей АНПА:

$$\vec{v}_w = \vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{r}_w. \quad (2.30)$$

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].

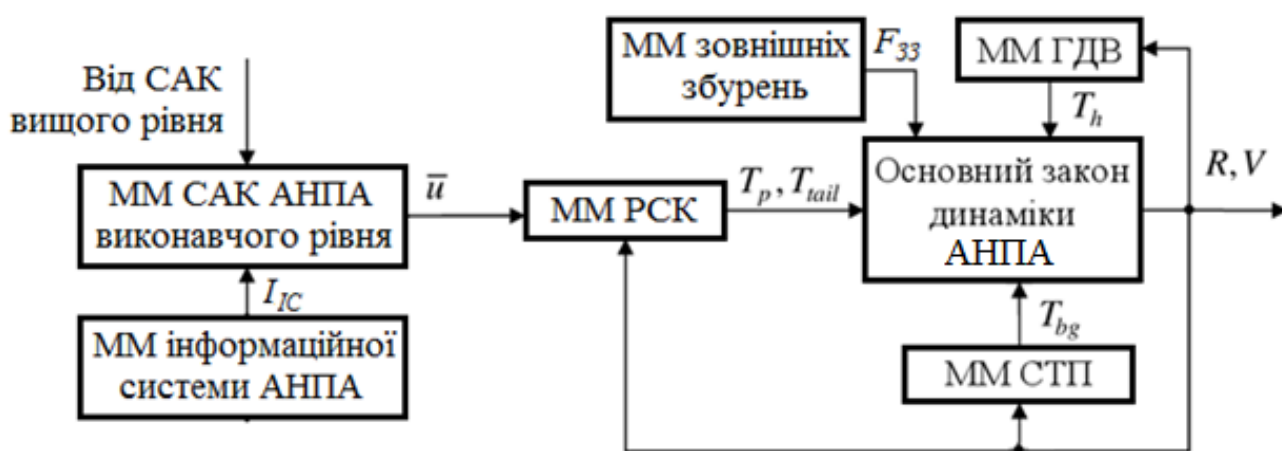


Рисунок 2.1 – Функціональна схема математичної моделі АНПА

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).

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]:

$$T = T_h + T_{gb} + T_{tail} + T_p, \quad (2.31)$$

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 конфігурацією гідродинаміки АНПА матриці сил та моментів ХО матимуть наступний вигляд:

$$T_h = \begin{bmatrix} F_{hx} & F_{hy} & F_{hz} & M_{hx} & M_{hy} & M_{hz} \end{bmatrix}^T; \quad (2.32)$$

$$T_v = \begin{bmatrix} F_{vx} & F_{vy} & F_{vz} & M_{vx} & M_{vy} & M_{vz} \end{bmatrix}^T; \quad (2.33)$$

$$T_{tail} = T_h + T_v = \begin{bmatrix} F_{tail(x)} & F_{tail(y)} & F_{tail(z)} & M_{tail(x)} & M_{tail(y)} & M_{tail(z)} \end{bmatrix}^T, \quad (2.34)$$

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 ризикання на правий борт і змушуватиме його повертати праворуч. При додатних значеннях керуючих впливів АНПА отримуватиме диферент на корму і буде спливати та ризикання 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 призначення 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 керування 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-диференціальний 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 когезії [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:

$$\begin{cases} d = (d_{\min 1} + d_{\min 2}) / 2; \\ d_{\min 1} = d_i \mid d_i - d_{i+1} \rightarrow \min; \\ d_{\min 2} = d_{i+1} \mid d_i - d_{i+1} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (2.35)$$

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

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).

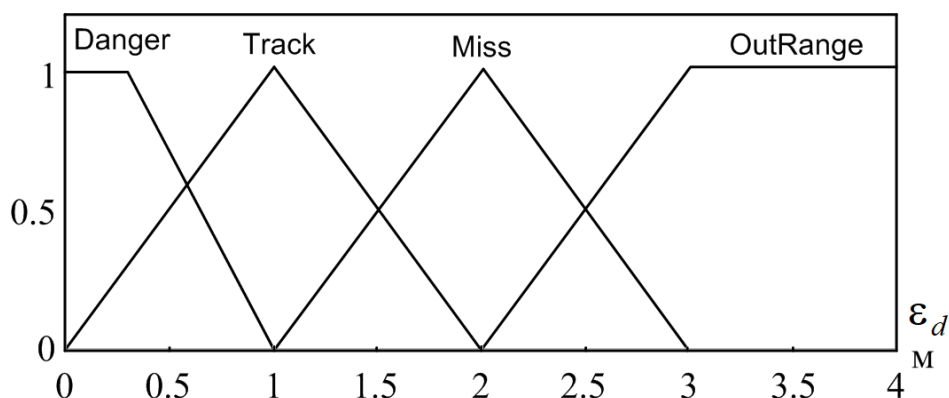


Рисунок 2.3 – Функція належності змінної ε_d

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

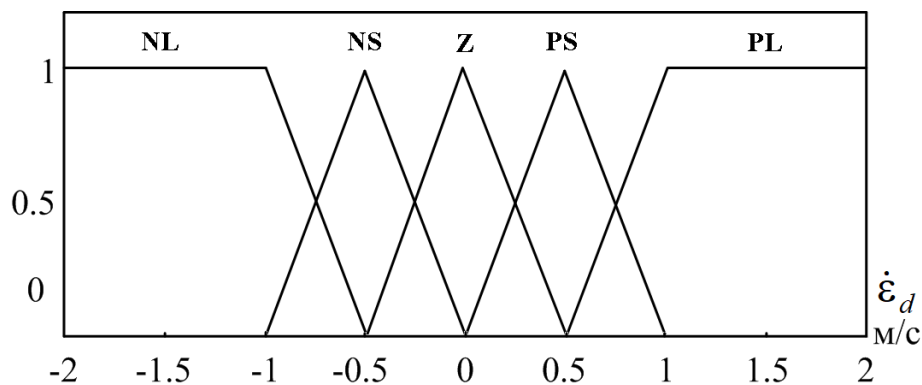


Рисунок 2.4 – Функція належності змінної $\dot{\varepsilon}_d$

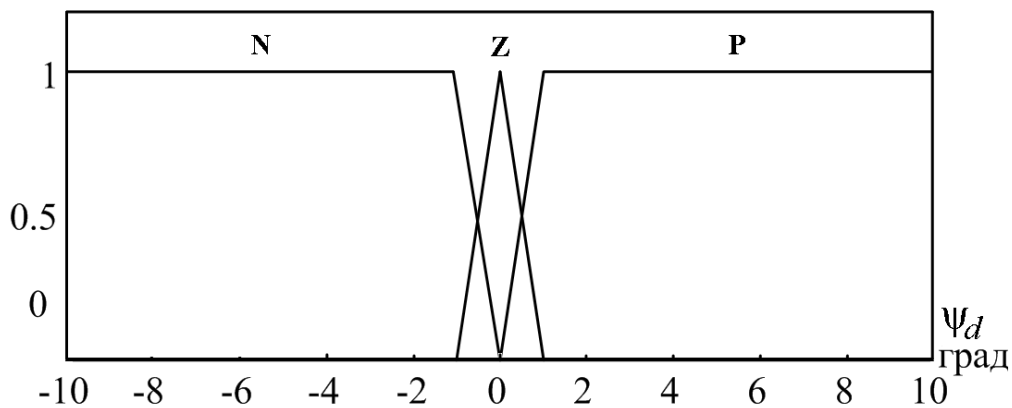


Рисунок 2.5 – Функція належності вихідної змінної ψ_d

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

База правил нечіткого регулятора зведена до табл. 2.1.

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.

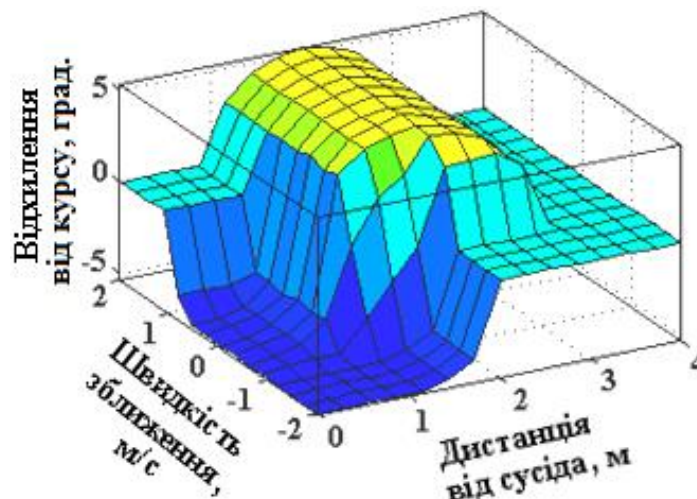


Рисунок 2.6 – Поверхня нечіткого виходу регулятора дистанції

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

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: (OB) – від’ємний великий кут (об’єкт віддаляється стрімко, на велику відстань); (OM) – від’ємний малий кут (об’єкт поступово віддаляється); (Track) – об’єкт рухається у межах заданої траєкторії; (PM) – додатній малий кут; (PB) – додатній великий кут, рис. 2.7.

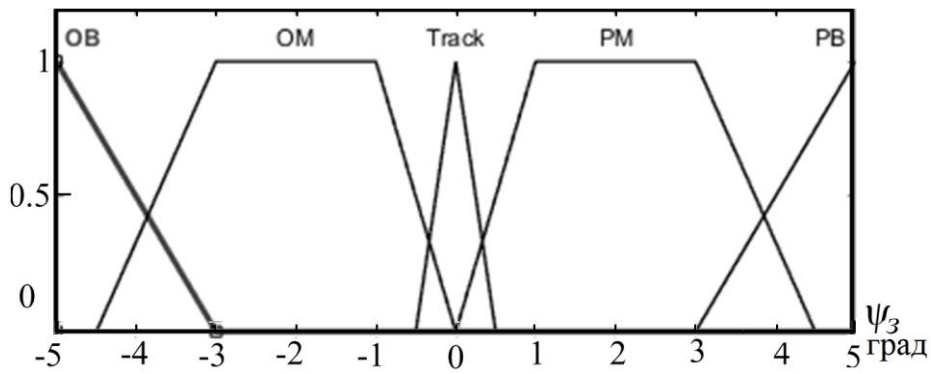


Рисунок 2.7 – Терми сигналу «кут відхилення»

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. 2.8.

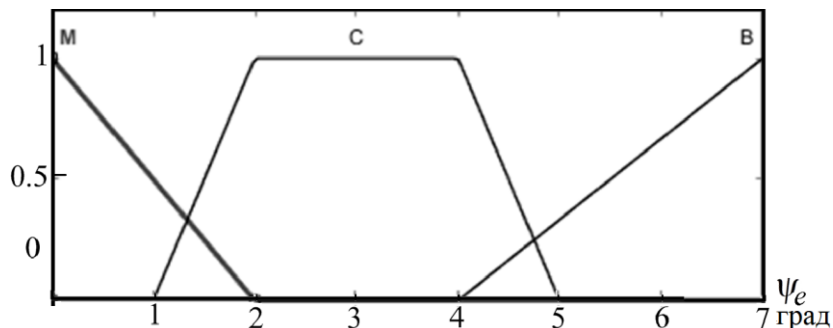


Рисунок 2.8 – Терми похибки регулювання

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. 2.9.

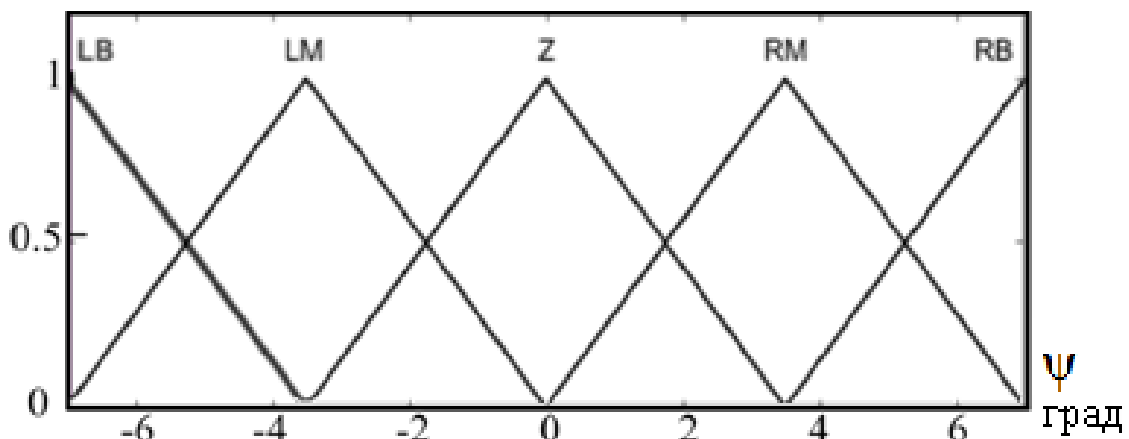


Рисунок 2.9 – Визначення вихідного керуючого сигналу

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 зведено до табл. 2.2 (R – вправо, Z – нуль, L – вліво), а поверхня нечіткого виводу показана на рис. 2.10.

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

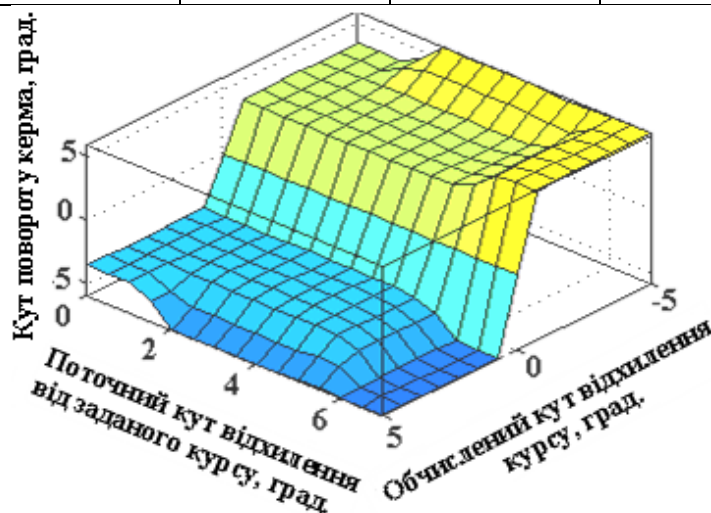


Рисунок 2.10 – Поверхня нечіткого виходу регулятора курсу

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

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

На рис. 2.11 представлено структурну схему САК, що дозволяє дослідити роботу власного АНПА у сукупності із АНПА-сусідом, що відхилився від заданого курсу.

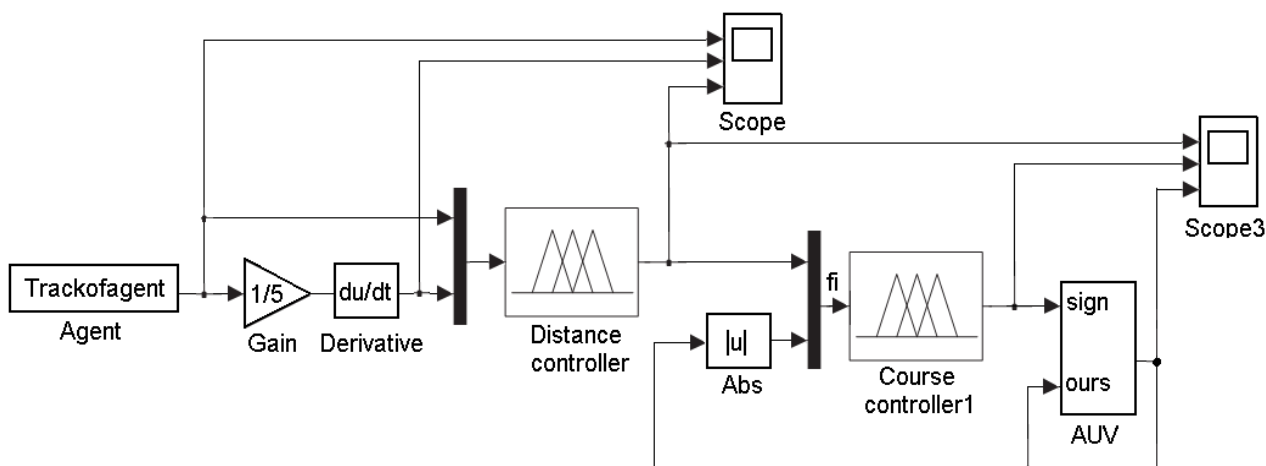


Рисунок 2.11 – Структурна схема САК АНПА, реалізована в системі Simulink

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

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

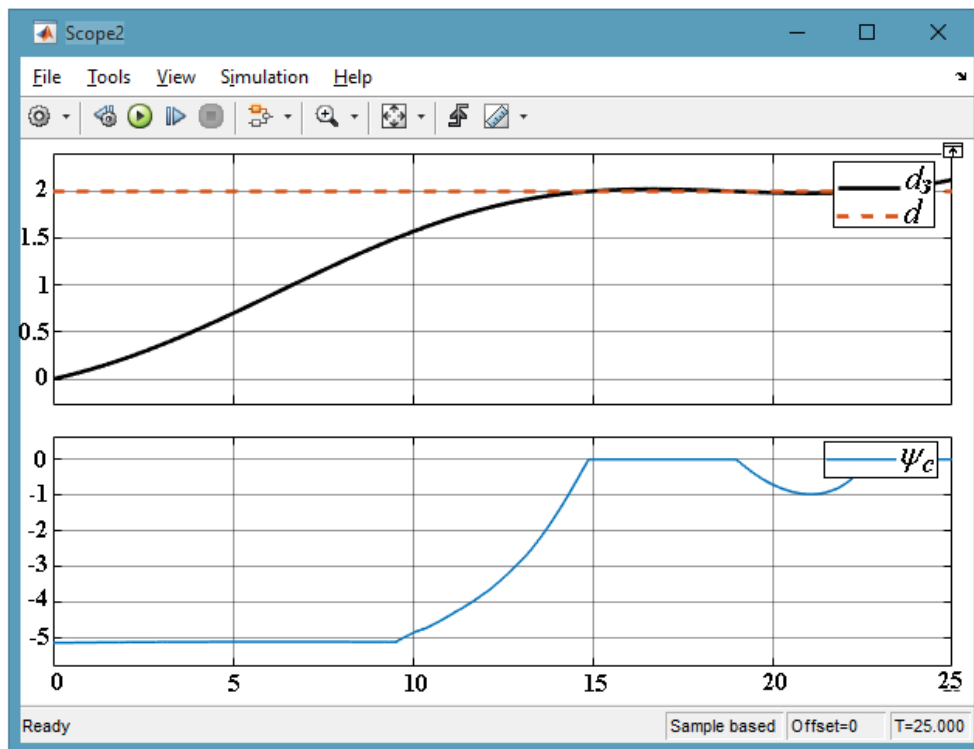


Рисунок 2.12 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії

Математичне моделювання роботи регулятора дистанції на нечіткій логіки 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)).

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.

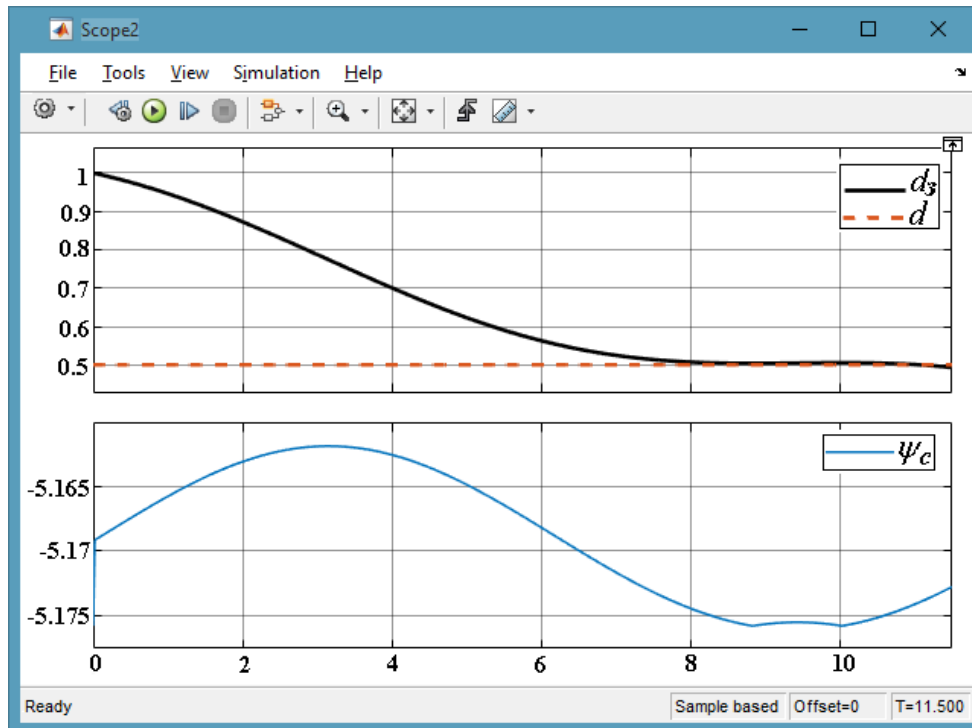


Рисунок 2.13 – Графіки перехідного процесу в режимі когезії

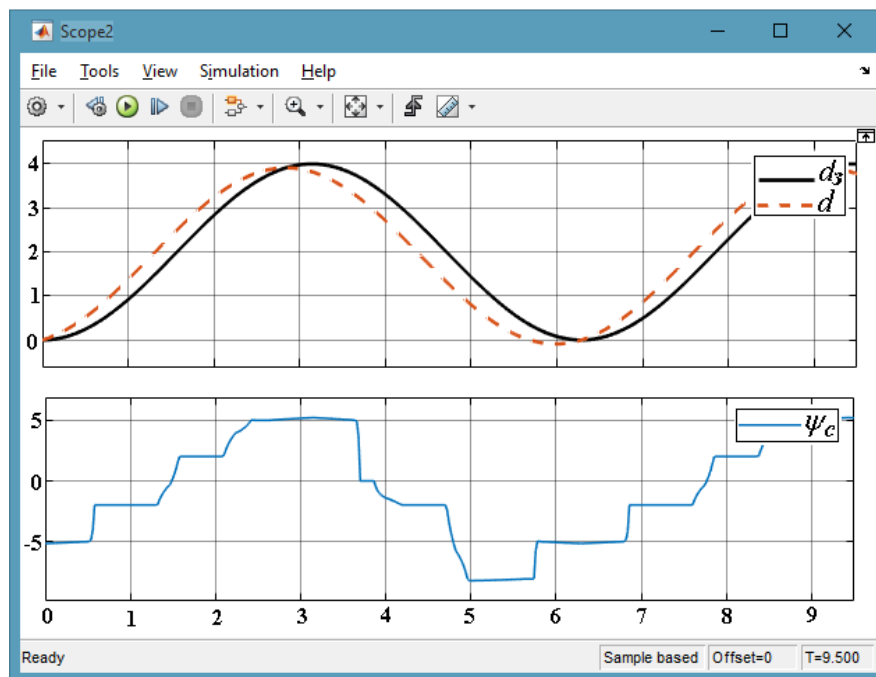


Рисунок 2.14 - Графіки перехідних процесів при гармонійному сигналі керування

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.

2.4.3. 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 різномірних 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].

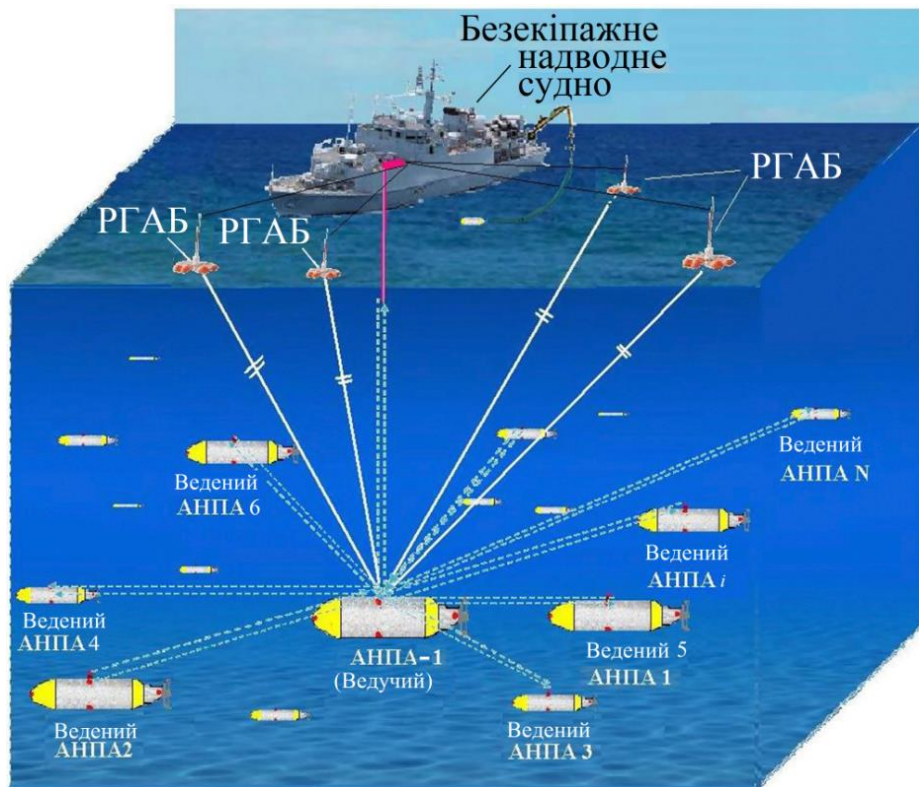


Рисунок 2.15 – Типове просторове розташування групи АНПА

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).

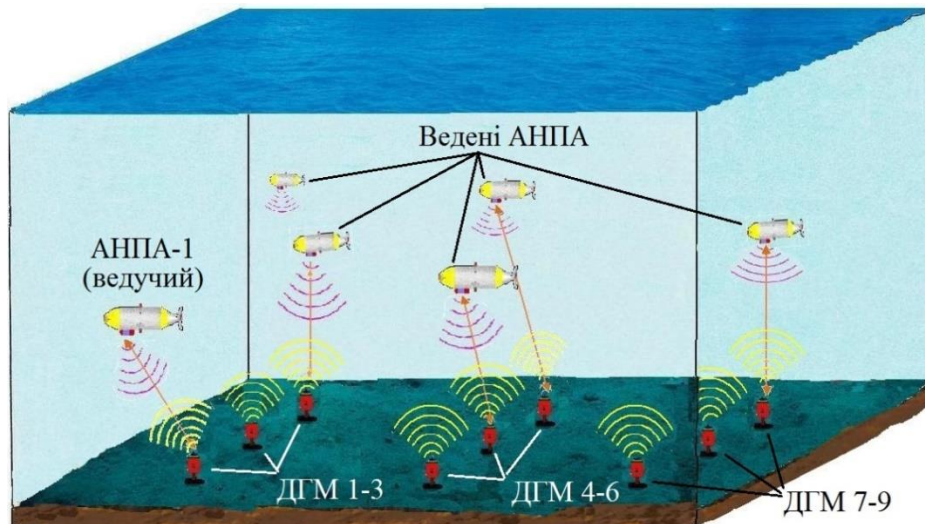


Рисунок 2.16 – Схема використання системи донної гідроакустичної навігації для групи АНПА

Тоді координати АНПА легко обчислюються на основі аналізу затримки сигналів від донних гідроакустичних маяків.

Виходячи з поставлених у задач роботі математичне моделювання процесів автоматичного керування рухом групи автономних самохідних підводних апаратів 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.

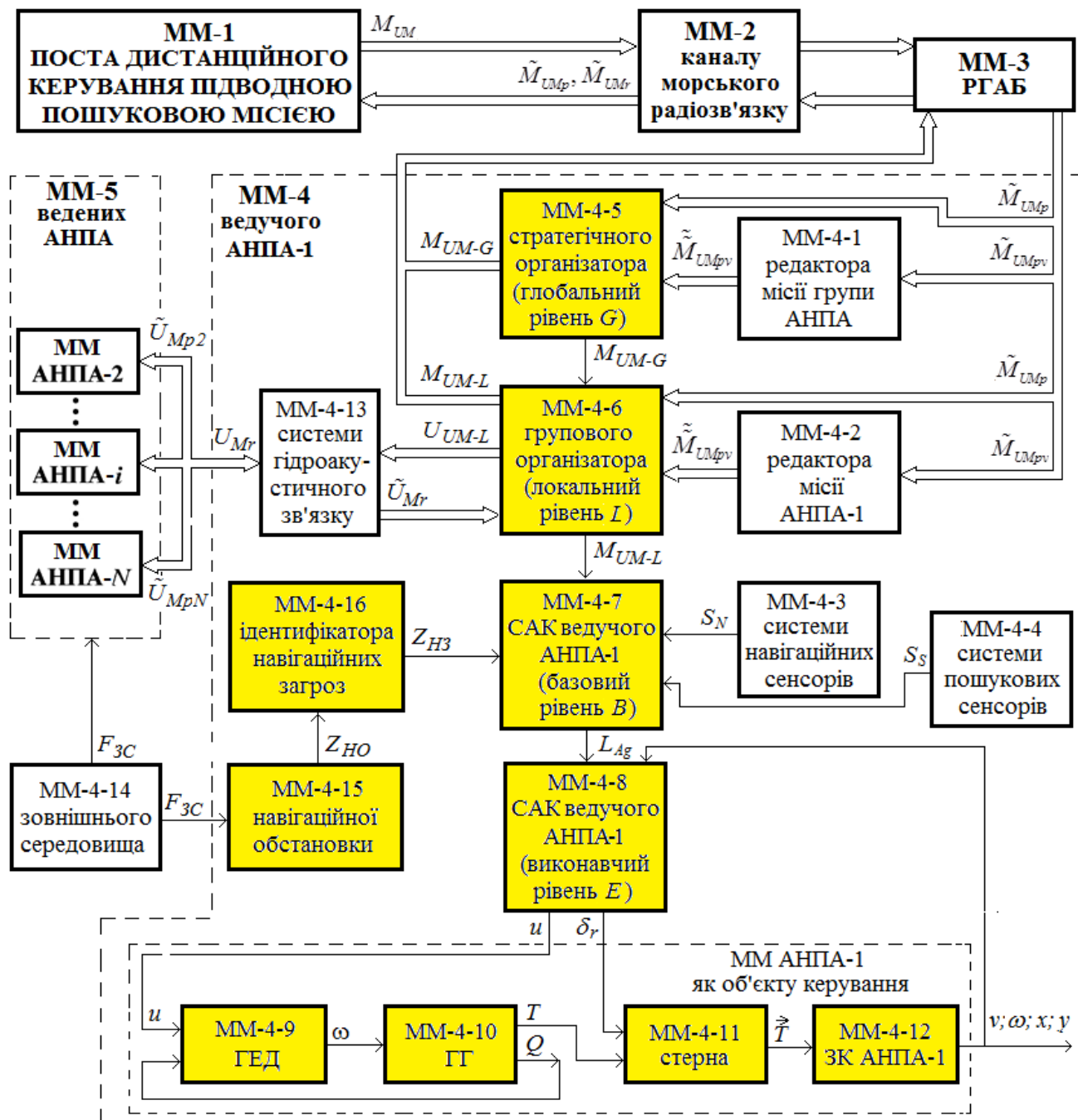


Рисунок 2.17 – Узагальнена структура моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА, що виконують спільну підводну пошукову місію (структурні блоки САК, які розглядаються далі у монографії, виділені заливкою)

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} :

$$M_{UMi} = \{A_{Hi}; A_{Wi}; Z_{Wij}; R_{Wij}\}. \quad (2.36)$$

Вхідною інформацією для ММ-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 ММ-2 і ММ-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 дослідження представлені описом двох головних їх властивостей:

пропускну здатність I_{MM-2} та I_{MM-3} ;

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

У роботі 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} :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{M}_{UMp} &= f_{UMp}(I_{MM-4-2}; I_{MM-4-3}; \Delta T_{MM-4-2}; \Delta T_{MM-4-3}); \\ \tilde{M}_{UMr} &= f_{UMr}(I_{MM-4-2}; I_{MM-4-3}; \Delta T_{MM-4-2}; \Delta T_{MM-4-3}). \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

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 роботі 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 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 роботі 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 роботі 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 перекладки стерна РСК АНПА-1 δ_t (у подальшому в роботі 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:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_{Mp} &= f_{Mp}(I_{MM-4-13}; \Delta T_{MM-4-13}); \\ \tilde{U}_{Mr} &= f_{Mr}(I_{MM-4-13}; \Delta T_{MM-4-13}, \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

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 пропускної 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_{H3} 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.

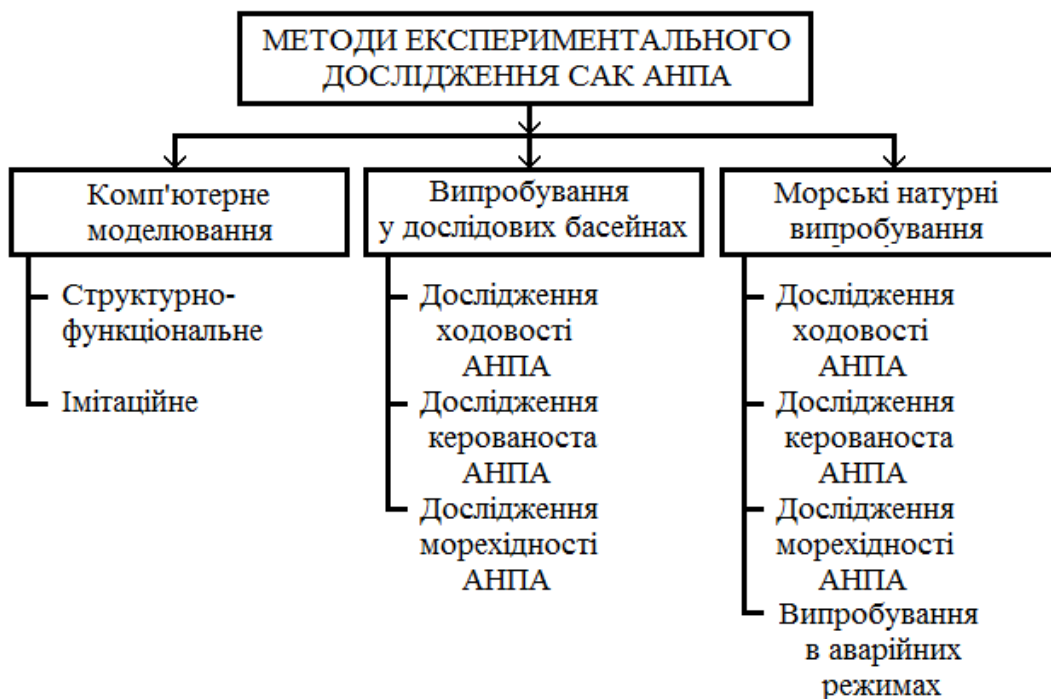


Рисунок 2.18 – Методи експериментального дослідження САК АНПА

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. Вого дає змогу 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 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 C_{Ag} автоматизації Со-Со-Ро - технологій – задачі автоматичного керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ 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].

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 ($v_i = v_1$) або різні ($v_i \neq v_1$).

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).

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

Типова місія Типовий рух	Пошук затону- лих об'єктів	Картогра- фування донної поверхні	Моніторинг підводного середовища	Обсте- ження протя- жних об'єк-тів	Наукові дослідження підводного середовища	Воєнне застосу- вання
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 концентрич- них колах	+		+	+	+	+
7. Рух по спіралі	+		+	+	+	+
8. Просторо- вий рух	-		+		+	+
Децентралізоване керування						
9. Ройовий рух	+		+		+	+
10. Зграйний рух	+		+		+	+
11. Колектив- ний рух	+		+		+	+

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).

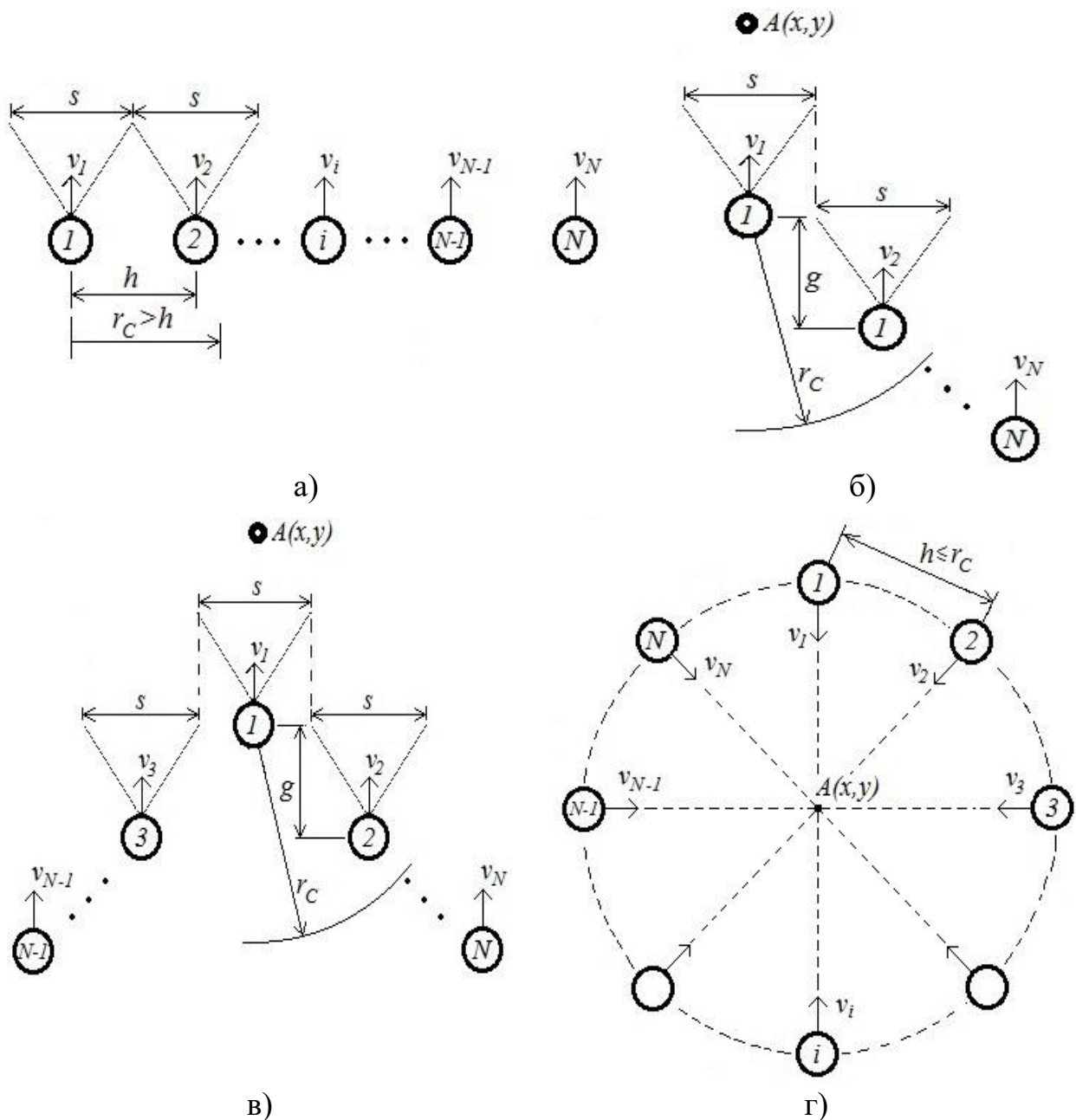


Рисунок 3.1 – Прямолінійні рухи групи АНПА

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

Ступінчасте зміщення АНПА g вибирається з урахуванням безпечності, 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 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.

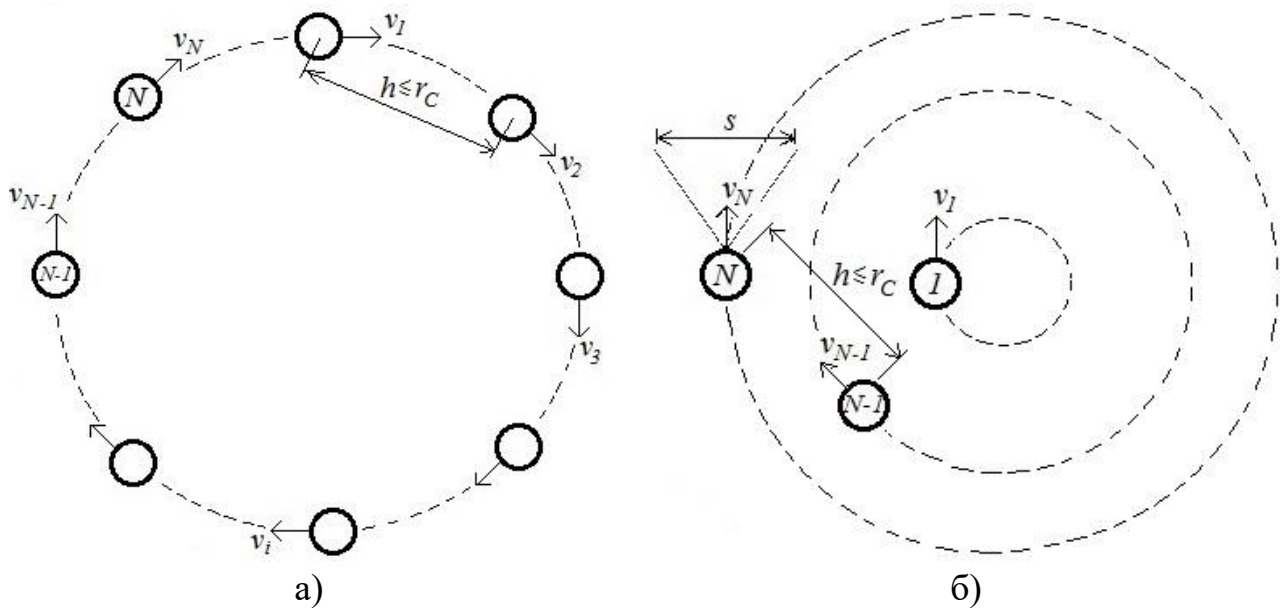


Рисунок 3.2 - Криволінійний рух групи АНПА

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 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} .

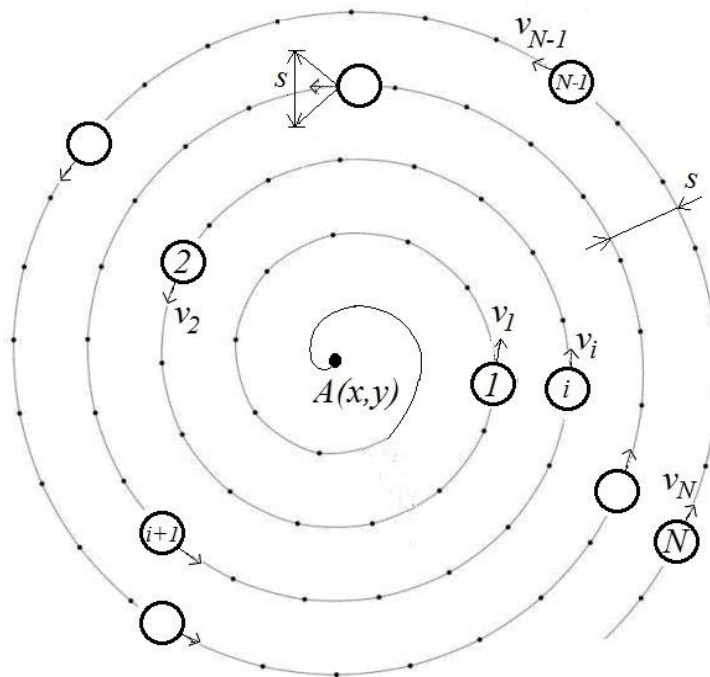


Рисунок 3.3 - Рух групи АНПА по загальній спіралі

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 вираховуваної 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.

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 безекіпажним 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 робіт.

Доставку групи АНПА в район проведення пошукових робіт доцільно виконувати за допомогою безекіпажного 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 місії.

Для виконання морської пошукової місії пропонується застосування морського безекіпажного 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].

Контроль за функціонуванням МБК може виконуватись дистанційно зі стаціонарного чи мобільного центру керування та контролю (ЦКК).

До головних задач створення такого комплексу належить визначення режимів його роботи та розробка узагальненої системи автоматичного керування (САК, в англomовній 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):

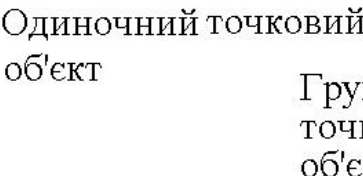
1 – автоматичний перехід МБК SC_{MUC1} з порту базування у задану точку морської акваторії, де планується виконання пошукових підводних робіт;

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);
- 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]:

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 та вимагає окремого дослідження.

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 формуванні 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.

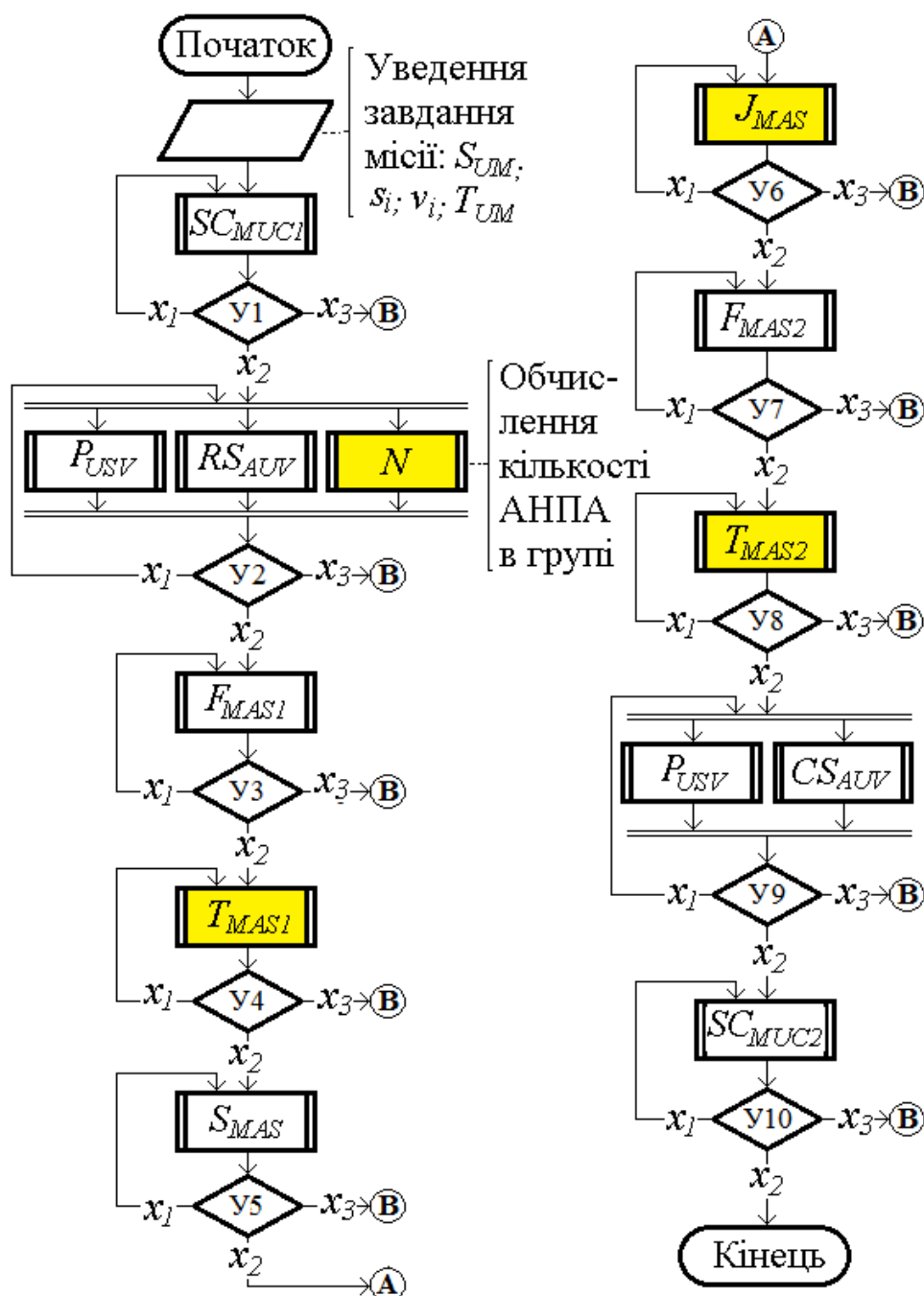


Рисунок 3.5 – Базова безекіпажна технологія виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК

На рисунку позначено:

У1...У10 – 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 подальших дослідженнях, наведених у цій роботі. 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. Це пояснюється високою надійністю й швидкістю виконання підводних робіт. Тому 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 різнорідних апаратів, 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 значну свободу вибору параметрів і має 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. 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.

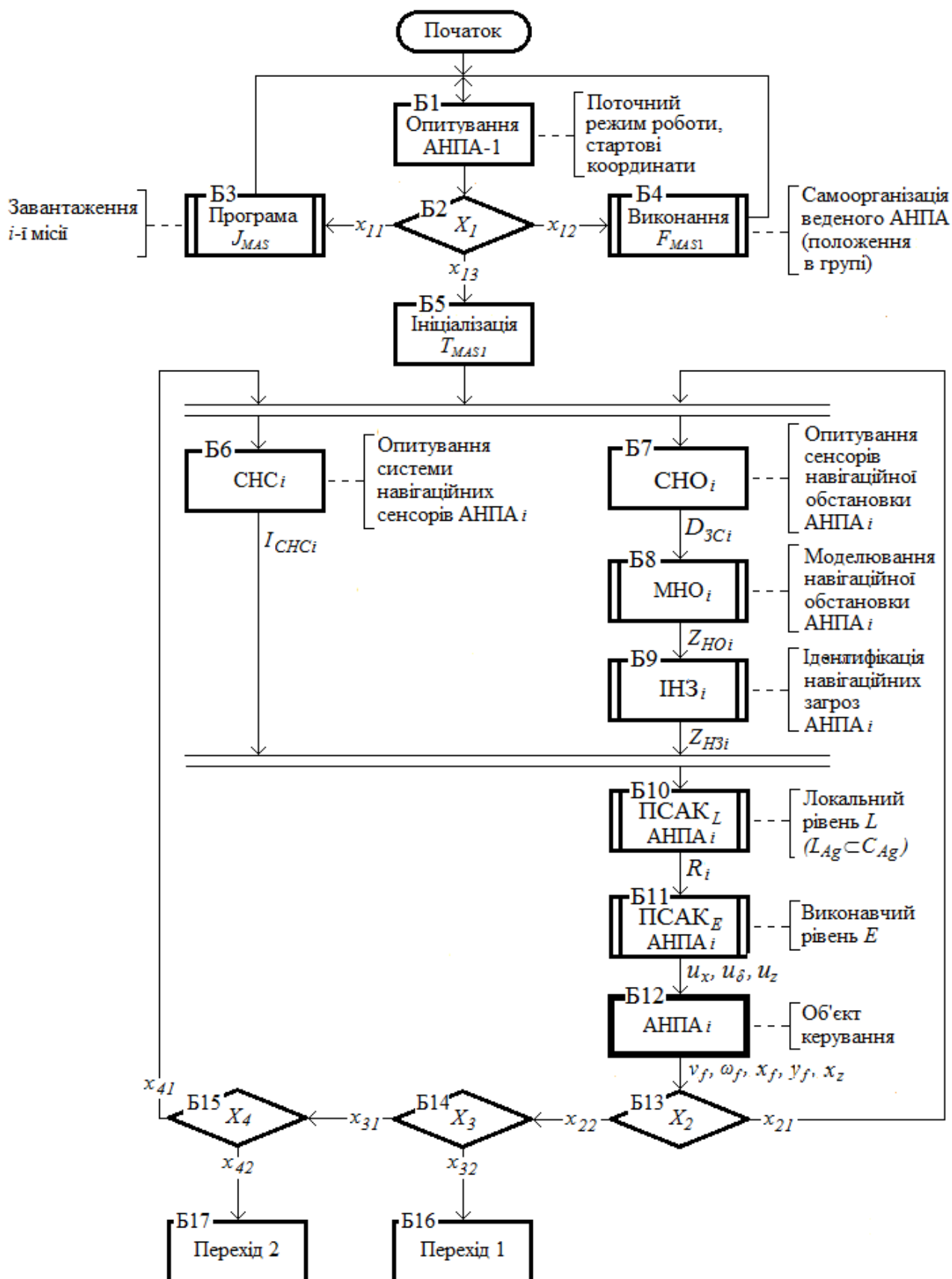


Рисунок 3.6. – Узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування i -м веденим АНПА в режимі групового переходу

Дано 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.

Б6 – блок опитування сенсорів навігаційної системи (СНС) i -го веденого АНПА, які дають інформацію I_{CHCi} 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_{HO} 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_{H3} 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 і, 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 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:

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

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, однаковій 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:

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

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 (курсівих 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»:

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

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).

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.

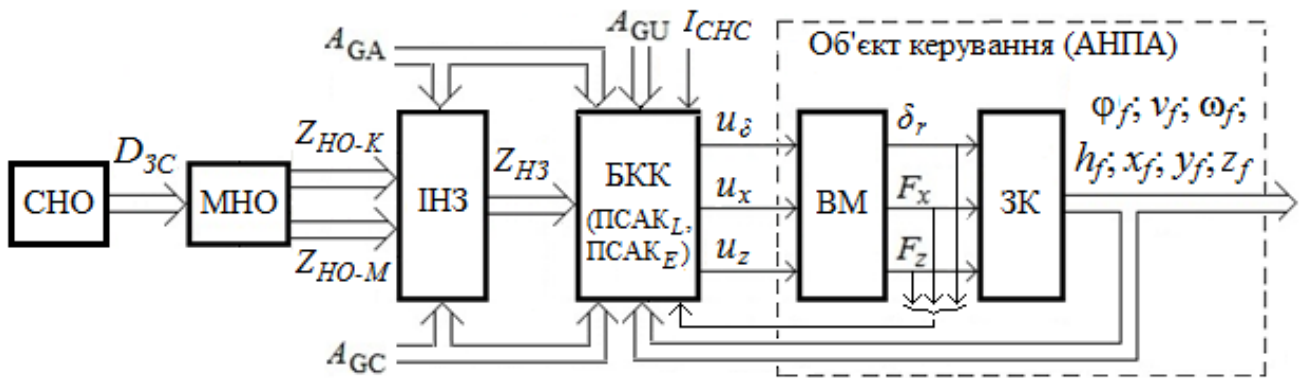


Рисунок 3.7 – Структура САК одиночним АНПА як агентом групи

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 CHO.

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

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

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

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 «розпорошення» 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:

$$D_{H3-K_1i} = \begin{bmatrix} d_{1K_1i} \\ \dots \\ d_{wK_1i} \\ \dots \\ d_{WK_1i} \end{bmatrix}; \quad V_{H3-M_1i} = \begin{bmatrix} v_{1M_1i} \\ \dots \\ v_{wM_1i} \\ \dots \\ v_{WM_1i} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

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

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:

$$P_{H3i} = \begin{bmatrix} p_{H31i} \\ \dots \\ p_{H3wi} \\ \dots \\ p_{H3Wi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_{1i} & \Delta v_{1i} & \Delta h_{1i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta\varphi_{wi} & \Delta v_{wi} & \Delta h_{wi} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta\varphi_{Wi} & \Delta v_{Wi} & \Delta h_{Wi} \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

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:

$$Z_{H3i} = \{D_{H3-K1i}; V_{H3-K1i}; P_{H3i}\}. \quad (3.31)$$

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_{H3i}) 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 $Z_{H3i} = \{D_{H3-Ki}; V_{H3-Ki}; P_{H3i}\}$, 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 $w \in W$:

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

- 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 Б6 (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 – $\{\varphi_f; v_f; \omega_f; h_f; x_f; y_f\}$, 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:

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

- 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:

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

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_{Hzi} 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_{Hzi} , 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 введенням 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_{3B} – швидкість зближення велика;

V_{3C} – швидкість зближення середня;

V_{3M} – швидкість зближення мала;

V_0 – нульова швидкість зближення (бажана);

V_{BM} – швидкість віддалення мала;

V_{BC} – швидкість віддалення середня;

V_{BB} – швидкість віддалення велика.

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

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_{Hzwi} базою правил $БП_{P_{Hz}}$, 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.

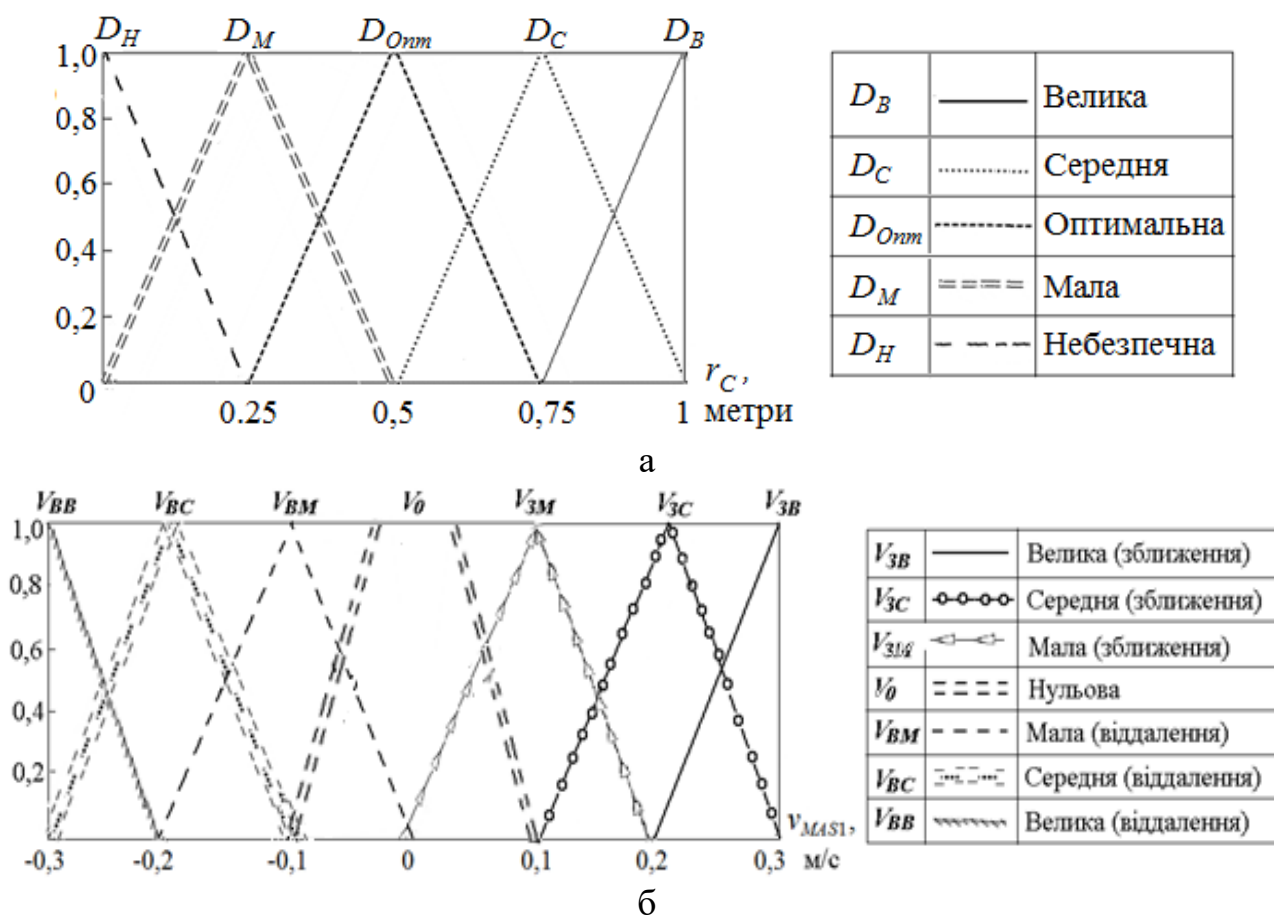


Рисунок 3.8 – Функції приналежності: а – вхідна змінна "дистанція до АНПА-сусіда", метри; б – вхідна змінна "швидкість зближення/віддалення, м/с

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).

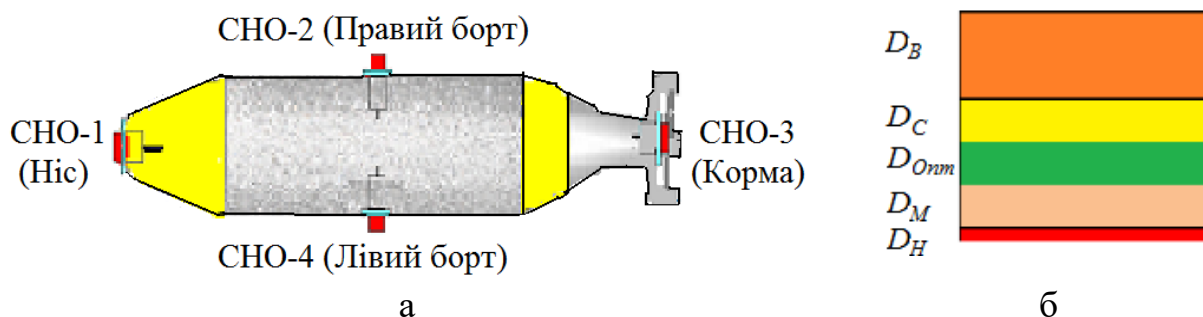


Рисунок 3.9 – Розташування сенсорів навігаційного зв'язку на ЗК i -го веденого АНПА (а) та градація дистанцій до АНПА-сусідів

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 системи координат АНПА (матриця рекомендацій P_{H3wi-Y} , база правил $БП_{P_{H3-Y}}$).

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).

У табл. 3.2 позначено:

$\Delta\theta_{wiM(m,c,\theta)}$ – 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, θ – великий кут перекладки;

Таблиця 3.2 – База правил $БП_{P_{H3-Y}}$ 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	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\theta}$	$\Delta\theta_{wiM\theta}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_C	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	$\Delta\theta_{wiMm}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\theta}$	$\Delta\theta_{wiM\theta}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_{Onm}	$\Delta\theta_{wiB\theta}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	$\Delta\theta_{wiMm}$	$\Delta\theta_{wiMc}$	$\Delta\theta_{wiM\theta}$
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_M	$\Delta\theta_{wiB\theta}$	$\Delta\theta_{wiB\theta}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
	D_H	0	0	$\Delta\theta_{wiB\theta}$	$\Delta\theta_{wiBc}$	$\Delta\theta_{wiBm}$	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
		Δh_{wi}	Δh_{wi}	0	0	0	0	0

$\Delta\theta_{wiB(m,c,\theta)}$ – 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'язаній 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 $\theta_{wi}=f(\Delta\theta_{wi})$, представленої на рис. 3.10.

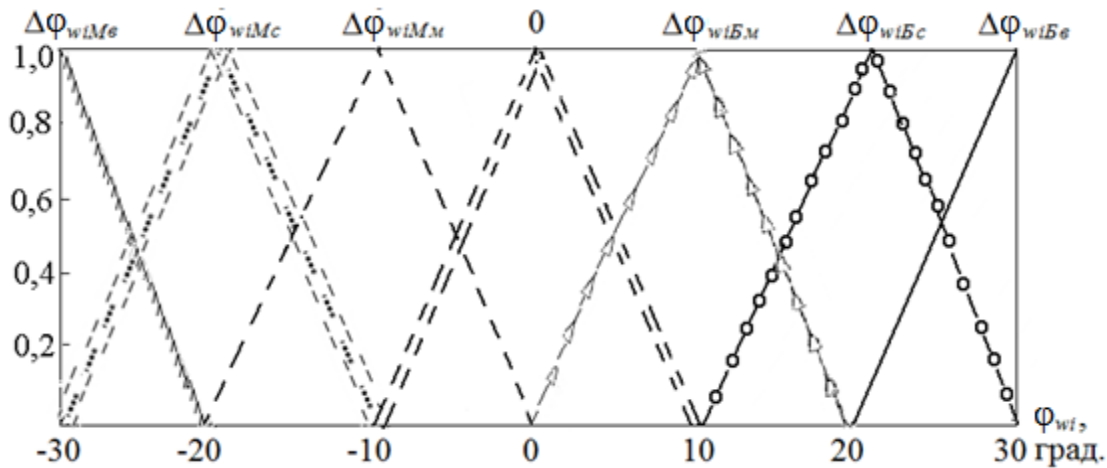


Рисунок 3.10 – Функція приналежності: вихідна змінна – кут перекладки стерна θ_{wi}

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 групою 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.

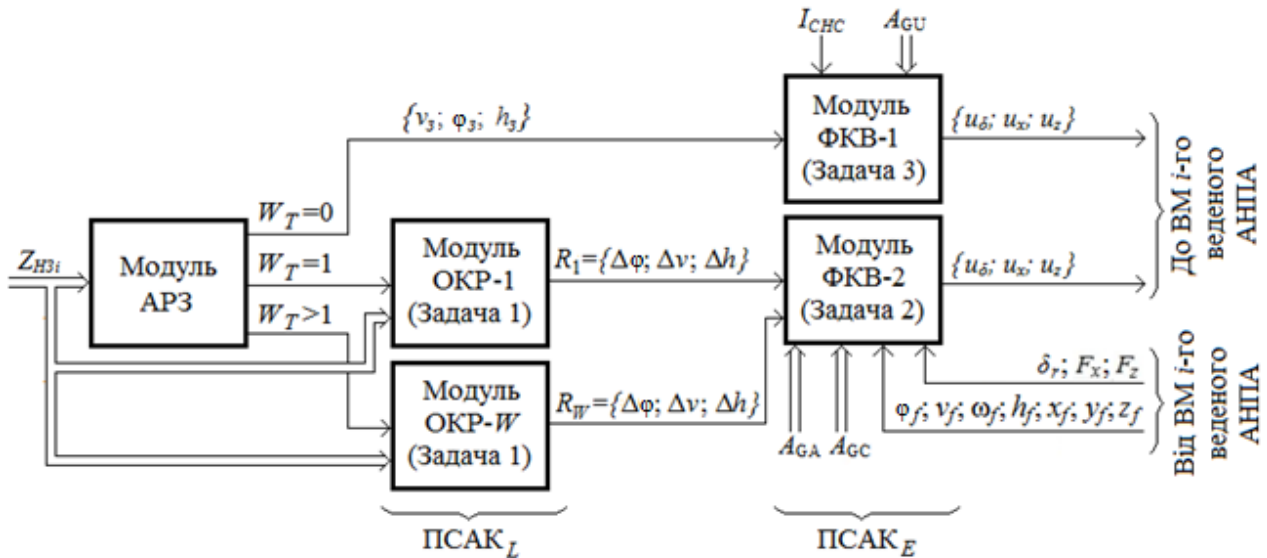


Рисунок 3.11 – Структура блоку «Бортовий керуючий контролер»

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.

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 ВМ 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 ВМ 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 $R_1=\{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_i\}$ 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 $R_i=\{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_i\}$ 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 CHO_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 CHO_i . Якщо носовий, правий, лівий і кормовий сенсори для i -го веденого АНПА позначити, відповідно, як CHO_N , CHO_P , CHO_L і CHO_K , отримаємо наступні комбінації напрямків можливих навігаційних загроз:

- дві одночасно виявлені загрози – $(CHO_N + CHO_P)$; $(CHO_N + CHO_L)$; $(CHO_N + CHO_K)$; $(CHO_P + CHO_L)$; $(CHO_P + CHO_K)$; $(CHO_L + CHO_K)$;
- три одночасно виявлені загрози – $(CHO_N + CHO_P + CHO_L)$; $(CHO_N + CHO_P + CHO_K)$; $(CHO_N + CHO_L + CHO_K)$; $(CHO_P + CHO_L + CHO_K)$;
- чотири одночасно виявлені загрози – $(CHO_N + CHO_P + CHO_L + CHO_K)$.

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 $(CHO_N + CHO_P)$, 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 ($СНО_{\text{П}} + СНО_{\text{Л}}$) діють по поперечній осі y), блок ОКР визначає найближчу по дистанції до загрози 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 контролюваного 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.

4. ДЕЯКІ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ ЯК НОСІЄМ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

4.1 Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв АНПА

Безекіпажні надводні судна (БНС, в англomовній літературі – Unmanned Surface Vehicles – USVs або Maritime Autonomous Surface Ships – MASS) знаходять все більше застосування при виконанні завдань з морських транспортних перевезень, дослідження ресурсів океанів та наукових досліджень, природоохоронних робіт та робіт із забезпечення морського права на морі у провідних морських країнах світу [132].

Створення та впровадження у морську практику такого виду морських суден на сьогодні оцінюється як магістральний напрямок розвитку водного транспорту [133].

Виділяють наступні переваги БНС у порівнянні з традиційними суднами з екіпажами [134, 135]:

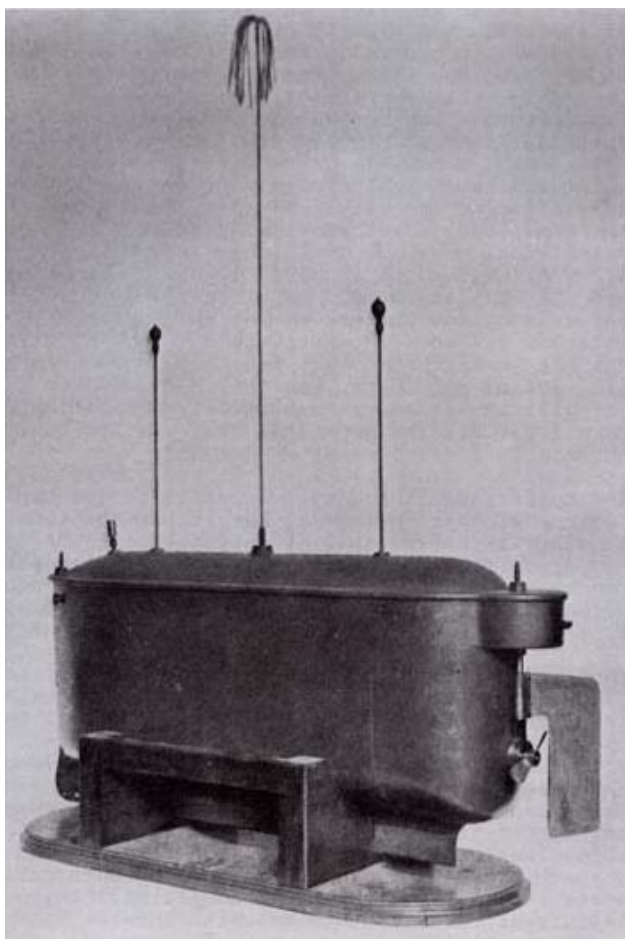
- БНС можуть виконувати більш тривалі й небезпечні місії;
- БНС мають нижчі витрати на технічне обслуговування та екіпажі для керування;
- мала вага й компактні розміри БНС забезпечують їм підвищену маневреність і можливості розгортання на мілководних акваторіях (річкових й прибережних районах), де більші кораблі не можуть ефективно діяти;
- БНС також мають більшу потенційну вантажопідйомність і можливість дистанційно виконувати типові морські операції.

Як було показано вище, такий вид морської робототехніки, як складова морського безекіпажного комплексу (МБК), може бути успішно використаний у якості носія для групи АНПА, які мають виконувати підводні місії на близьких і на віддалених акваторіях.

Конструкції БНС та технології їхнього застосування пройшли декілька стадій розвитку, тісно пов'язаних з прогресом технічних наук та поточних потреб морських держав.

Історично першим патентом щодо БНС був патент Ніколо Тесли у 1898 року [136] (рис. 4.1, а). Крім доставки вантажів і зв'язку з важкодоступними місцевостями, автор згадує про військові цілі свого винаходу: «Гарантована і безмежна руйнівність мого винаходу дозволить встановити і підтримувати вічний мир між народами».

Однак перші реально створені БНС з'явилися у Німеччині на початку ХХ сторіччя. Ці судна були керованими по спеціальному кабелю. Проте наприкінці Першої світової війни в німецькому флоті з'явилися також бездротові радіокеровані катери [137].



а



б

Рисунок 4.1 – Прототипи БНС минулих століть: а – радіокерована модель судна Ніколи Тесл (1898 р.); б – стадії застосування швидкісних катерів МТМ та МТР (40-ві роки XX-го сторіччя)

Радянська Росія також розробляла радіокеровані катери для потреб оборони портів на Балтиці. Так, у 1924 році було створено два типа радіокерованих катерів – «Піонер» і «Оса», які передбачали радіокерування з берегового поста керування та з літака [138]. А на військових навчаннях 1937 року у Фінському заливі вже приймали участь біля 50 радіокерованих катерів.

Одним з перших напрямків практичного застосування БНС було їх використання Італією у Другій світовій війні як засобу доставки вибухівки для знищення надводних військових кораблів Великобританії на Середземному морі [139]. Тоді було успішно застосовано малорозмірні швидкісні катери МТМ та МТР. На стадії підходу до цілі такий катер керувались людиною, яка після прицілювання катера залишала його на рятувальному плоту, а катер на прикінцевій стадії атаки керувався автоматично (рис. 4.1, б).

Після Другої світової війни в США БНС були розроблені та використані для двох основних цілей: протимінної боротьби на морі та для оцінки бойових пошкоджень надводних кораблів під час випробувань атомних бомб [140] (рис. 4.2, а).



а



б



в

Рисунок 4.2 – Розробки БНС ХХ-го сторіччя: а – проривач мінних загороджень проекту 1300 (СРСР). Водотоннажність - 90 т, довжина - 25 м, ширина - 5 м, осадка - 1,5 м, енергоустановка - дизельний двигун (300 к.с.), швидкість ходу - 18 вузлів; б – "Гауст гард", виробництво компанії "МРВ Інтернешнл". Довжина - 19 футів (5,79 м), корпус із армованого склопластику, двигун – дизель (266 к.с.); в – безекіпажний патрульний катер "Протектор" (Ізраїль). Довжина - 9,11 м, енергоустановка - дизельний двигун, рушій - малогабаритний водомет, швидкість ходу - 40 уз., автономність – 10–35 годин, система навігації - радар, GPS-приймач, інерційна навігаційна система

Наприкінці ХХ сторіччя інтерес до застосування БНС з'явився в Ізраїлі з-за необхідності автоматизувати операції з охорони морського узбережжя та акваторій портів.

Як результат, з 2004 року було успішно застосовано у складі військово-морських сил декілька типів малорозмірних безекіпажних катерів: "Protector", "Seagull", "Katana", "Stingray" та "Silver Marlin" [141, 142].

Головне їх призначення – протистояння терористичним загрозам з моря, розвідка, спостереження та ведення протимінної війни (рис. 4.2, б-в).

Одночасно розвивали свої БНС США, де у 2006 році було розроблено генеральний план створення БНС для потреб військово-морського флоту [140].

Пізніше, з 2012 року, в рамках європейської програми "MUNIN" розпочались прикладні наукові дослідження щодо розробки концепції керування БПС та оцінки технічної, економічної та правової складових їх використання [143]. Метою дослідження було наукове обґрунтування доцільності та можливості створення морських БНС транспортного типу, які б могли забезпечити безпечні океанські перевезення.

Головна ідея проекту полягала в оснащенні вантажних суден спеціальними сенсорними системами й бортовими комп'ютерами, які дають змогу їм безаварійно рухатись у складних навігаційних умовах у повністю автоматичному режимі.

У подальшому в багатьох морських країнах світу розгорнулись теоретичні дослідження та роботи зі створення БНС різного призначення, з'явилися наукові огляди та практичні узагальнення щодо результатів застосування БНС [144-146].

Науковці і проектувальники акцентували увагу на перспективності нового засобу морської транспортної робототехніки та, одночасно, вказували на низку проблем щодо її практичної реалізації.

Так, у рамках подальшого розвитку ідей програми "MUNIN" на протязі 2015-2017 років було виконано проєкти "AAWA", головним виконавцем якого була англійська фірма "Rolls-Royce" (Великобританія) [147]. Проєкт об'єднав університети, проєктні організації, виробників обладнання та класифікаційні товариства для вивчення економічних, соціальних, правових, нормативних та технологічних факторів, які необхідно вирішити, щоб БНС стали реальністю.

У рамках проєкту його учасники шукали відповіді на три наступні питання:

- які повинні бути технології керування БНС і як вони повинні взаємодіяти при його автономному плаванні;
- як потрібно спроектувати таке судно, щоб воно було настільки ж безпечним, як і звичайні судна, які нові ризики з'являються і як їх уникнути;
- які повинні бути спонукальні мотиви для судновласників вкладати кошти в БПС і хто після їх "легалізації" буде відповідальний у випадку того або іншого інциденту.

Одночасно з проєктом "AAWA" у Норвегії було реалізовано проєкт "AUTOSEA" [148], основною метою була розробка методів судноводіння та навігації БНС. Цей проєкт підтвердив ефективність системи запобігання зіткненням у повномасштабних натурних експериментах, що дало змогу реалізувати проєкт автоматичного автомобільного порому для Балтійського моря [149].

Подальшим розвитком проєкту "AUTOSEA" був проєкт Євросоюзу "Hull-to-Hull" [150], метою якого було забезпечення безпечного плавання в безпосередній близькості від інших суден на основі застосування систем супутникової навігації. Такий підхід дозволяє прецизійно оцінювати як відстань до навколишніх об'єктів, включаючи судна, що рухаються, так і швидкість зближення з ними.

Сьогодні у всьому світі нараховується більш ніж 1000 морських автономних надводних суден, які експлуатуються більш ніж 53 організаціями [151].

На рис. 4.3 наведено зовнішній вигляд типових БНС різних архітектурно-конструктивних типів та різного призначення.



а



б



в



г



д



е



ж



з

Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд сучасних БНС різного призначення

Наведені на рис. 4.3 БНС мають наступне призначення:

а – БНС з дистанційним керуванням «Maxlimer» фірми «Sea-Kit International» (Канада), призначене, у тому числі й для роботи з АНПА [152];

б – багатоцільове БНС «SeaFly-01» фірми «Beijing Sifang Automation» (КНР) [153];

в – дистанційно кероване через супутник БНС USV XO-450 компанії «XOCEAN» (Канада) для збору батиметрических даних у внутрішніх водах Канади [154];

г – БНС «ORCA UBOAT» (США) для водного серфінгу [155];

д – протимінне БНС «Seagull» (Великобританія [156];

е – БНС «TITAN» (КНР) для очищення мілководних водойм шляхом косіння водних рослин [157];

ж – БНС «C-Worker 5» (Канада) для обстеження підводних кабельних трас [158];

з – БНС-вітрильник «Saildrone» (США) з сонячними елементами для проведення океанографічних досліджень [159].

На цей час основними напрямками застосування БНС, виходячи з огляду науково-технічних публікацій [134, 160, 161], є науково-дослідницькі, прикладні гідрографічні, природоохоронні та аварійно-рятувальні морські роботи.

Саме за цими напрямками автори і вбачають доцільність і можливість використання БНС як носіїв АНПА для їх транспортування до акваторій, де вони мають виконувати групові підводні місії.

4.2 Формулювання головних задач створення БНС на основі системного підходу

З позицій системного підходу до проектування засобів морської робототехніки [162] до генеральної множини $T_{БНС}$ головних задач створення БНС такого призначення слід віднести наступну множину задач, успішний розв'язок яких забезпечить їх конкурентоздатність на ринку морської техніки:

- множину $T_{БНС-К}$ задач раціонального вибіру форми корпусу БНС, який би максимально повно відповідав вимогам до морехідності таких суден – остійності, міцності, водонепроникності, непотоплюваності, плавучості, керованості (задача $T_{БНС-К-М} \in T_{БНС-К}$) та вимогам до ефективного виконання всього переліку режимів щодо застосування АНПА (задача $T_{БНС-К-Еф} \in T_{БНС-К}$); зазначимо, що на цей час використовують чотири основні форми корпусу БНС: твердий надувний корпус, однокорпусні (типу «каяк»), катамаран (двохкорпусні) та тримарани (трьохкорпусні);

- множину $T_{БНС-Е}$ задач вибору типу та потужності головної енергетичної установки – дизель-електрична, акумуляторна, вітрогенераторна, фотоелектрична тощо (задача $T_{БНС-Е-ГЕУ} \in T_{БНС-Е}$) та рушійно-стернового комплексу БНС – гребні гвинти у насадках, поворотні рульові колонки,

водомети тощо (задача $T_{\text{БНС-Е-РК}} \in T_{\text{БНС-Е}}$); крім того, важливою складовою підмножини задач $T_{\text{БНС-Е}}$ є задача побудови інтегрованої електроенергетичної системи БНС (в англійській літературі – Integrated Power and Energy Systems, IPES), яка б забезпечила оптимізацію процесів зберігання та ефективного використання бортової енергії з метою збільшення часу виконання морської місії БНС (задача $T_{\text{БНС-Е-Інт}} \in T_{\text{БНС-Е}}$) [163];

- множину $T_{\text{БНС-І}}$ задач синтезу систем інформаційно-керуючого забезпечення функціонування БНС – автоматизованого (телекерування по радіоканалу) чи автоматичного (електронна навігація) керування рухом БНС (задача $T_{\text{БНС-І-Рух}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування двохстороннім радіо- чи супутниковим зв'язком між БНС та центром керування і контролю (ЦКК, задача $T_{\text{БНС-І-З}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування бортовим технологічним обладнанням – системами керування енергетичним та інформаційним забезпеченням групи АНПА перед початком місії, системою запуску групи АНПА з борту БНС згідно залежності (3.16), другий етап $RS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$, та дев'ятий етап $CS_{\text{AUV}} \in A_{\text{MUC}}$ (задача $T_{\text{БНС-І-БТО}} \in T_{\text{БНС-І}}$), автоматизованого чи автоматичного керування загальносудновими механізмами – електро- та гідравлічним обладнанням безекіпажного судна (задача $T_{\text{БНС-І-ЗСМ}} \in T_{\text{БНС-І}}$);

- множину $T_{\text{БНС-Ј}}$ задач синтезу складових БНС, які забезпечують ефективне застосування групи АНПА за основним призначенням; зокрема, на сьогодні до таких складових можна віднести розробку берегового чи мобільного центру керування і контролю БНС (задача $T_{\text{БНС-Ј-ЦКК}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$), розробку системи керування корисним вантажем (КВ) БНС – систему випуску групи АНПА з борту БНС як об'єкта автоматизованого чи автоматичного керування (задача $T_{\text{БНС-Ј-КВ}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$) та розробку вбудованих систем діагностики і захисту електромеханічного обладнання БНС (задача $T_{\text{БНС-Ј-Діагн}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$ та задача $T_{\text{БНС-Ј-Зах}} \in T_{\text{БНС-Ј}}$)

Таким чином, генеральна множина $T_{\text{МБК}}$ головних задач створення МБК може бути представлена у вигляді:

$$T_{\text{МБК}} = [T_{\text{БНС-К}}; T_{\text{БНС-Е}}; T_{\text{БНС-І}}; T_{\text{БНС-Ј}}], \quad (4.1)$$

де:

$$T_{\text{БНС-К}} = \{T_{\text{БНС-К-М}}; T_{\text{БНС-К-Еф}}\}; \quad (4.2)$$

$$T_{\text{БНС-Е}} = \{T_{\text{БНС-Е-ГЕУ}}; T_{\text{БНС-Е-РК}}; T_{\text{БНС-Е-Інт}}\}; \quad (4.3)$$

$$T_{\text{БНС-І}} = \{T_{\text{БНС-І-Рух}}; T_{\text{БНС-І-З}}; T_{\text{БНС-І-БТО}}; T_{\text{БНС-І-ЗСМ}}\}; \quad (4.4)$$

$$T_{\text{БНС-Ј}} = \{T_{\text{БНС-Ј-ЦКК}}; T_{\text{БНС-Ј-КВ}}; T_{\text{БНС-Ј-Діагн}}; T_{\text{БНС-Ј-Зах}}\}. \quad (4.5)$$

Виходячи з (4.1)-(4.5) можна констатувати, що розробка БНС як носіїв групи АНПА є складним прикладним науковим завданням, яке необхідно виконувати із залученням багатьох наукових та інженерних дисциплін.

Тут розглянемо лише дві задачі з генеральної множини (4.1), які пов'язані з автоматизацією керування БНС: задачу $T_{\text{БНС-I-Рух}} \in T_{\text{БНС-I}}$ вдосконалення керування рухом БНС та задачу $T_{\text{БНС-J-Вип}} \in T_{\text{БНС-J}}$ випуску групи АНПА з борту БНС-носія, яка входить у підмножину $T_{\text{БНС-J}}$.

У якості першого кроку до розв'язку вказаних задач розглянемо загальні властивості та особливості БНС як об'єкту автоматичного керування.

4.3 Особливості БНС як об'єкту автоматичного керування

БНС-носії групи АНПА являють собою об'єкти морської робототехніки, які функціонують під керуванням систем автоматичного керування різного призначення та рівня складності.

Автоматичне керування БНС являє собою складну прикладну наукову задачу, до основних особливостей синтезу якої можна віднести:

- суттєву нелінійність БНС як об'єкту керування, обумовлену нелінійним характером його виконавчих механізмів та нелінійним характером обтікання корпусу судна як твердого тіла, яке рухається у воді;
- невизначеність зовнішніх збурень, які діють на корпус БНС (вітрохвильових збурень та збурень, породжуваних течіями).

Наукові розробки, пов'язані з синтезом та дослідженням САК БНС, наразі проводяться у більшості провідних морських країн світу, оскільки такі судна утворюють серйозну альтернативу традиційному водному транспорту, у тому числі й на внутрішніх водних шляхах [164-166].

Як об'єкти автоматизації БНС утворюють особливий клас морських рухомих об'єктів, для яких характерним є рух з високою швидкістю (до 45 вузлів), часте маневрування зі значними прискореннями [167]. Важливо відзначити, що функціонування розглянутого класу суден часто здійснюється в районах з обмеженими навігаційними умовами і вимагає великої точності утримання на заданій траєкторії.

Виходячи з цього, автоматизація керування БНС як носія групи АНПА, у залежності від вимог практики може бути реалізована за наступними рівнями:

- рівень телекерування LC_T (дистанційне ручне керування людиною-оператором процесів руху БНС та його бортовим технологічним обладнанням з берегового чи мобільного ПКК);
- рівень автоматизованого керування LC_{AT} (за участю людини-оператора, коли стабілізація курсу, траєкторії та швидкості судна виконуються автоматично, але під контролем людини-оператора з можливістю оперативного втручання у критичних ситуаціях; при цьому, керування бортовим технологічним обладнанням БНС виконується людиною-оператором у режимі телекерування);
- рівень автоматичного керування LC_T (забезпечує повністю автоматичне керування БНС в усіх режимах його функціонування, включаючи електронну навігацію, зв'язок з ЦКК, керування бортовим технологічним обладнанням та

загальносудновими механізмами; телекерування залишається як форма контролю безпеки функціонування БНС);

- рівень інтелектуального керування LC_I (ґрунтується на застосування теорії штучного інтелекту і забезпечує здатність до «розуміння» і навчання САК щодо БНС як об'єкта керування, збурень зовнішнього середовища та умов роботи м [168]; вказані властивості дають змогу реалізувати високоточні САК траєкторним рухом технічних систем, коли їх математична модель невідома чи недостовірна.

Таким чином, множина основних рівнів автоматизації БНС може бути представлена наступною залежністю:

$$LC_T = \{LC_T; LC_{AT}; LC_T; LC_I\}. \quad (4.6)$$

Крім того, САК БНС повинна відповідати наступним вимогам [167]:

- забезпечувати безперервність і завадозахист виробленню навігаційних параметрів, а також забезпечувати точність утримання на траєкторії в межах 2-5 метрів;

- склад САК повинен бути компактним, тобто містити мінімальну необхідну кількість приладів;

- прилади системи повинні мати малі масогабаритні характеристики, низьку вартість та низьке енергоспоживання;

- САК повинна забезпечувати ефективне функціонування БНС в умовах хвилювання моря до 3-х балів.

Розглянемо тепер основні режими роботи БНС як носія групи БНС.

Виходячи з основних завдань експлуатації БНС сформулюємо основні режими його функціонування при повній автоматизації:

- режим прямолінійного руху зі стабілізацією курсу φ та швидкості v ;

- режим руху по заданій траєкторії зі стабілізацією швидкості руху v ;

- режим маршрутної точки, коли САК БНС прагне довести судно до заданої маршрутної точки, постійно оновлюючи свій курс, що змінюється внаслідок дії зовнішніх збурень;

- режим циркуляції з заданими значеннями радіусу циркуляції r_c та кутової швидкості ω ;

- режим позиціонування у точці (для спуску групи АНПА перед виконанням підводної місії та для прийому їх на борт після завершення підводної місії);

- режим дрейфу на акваторії, де виконується підводна місія.

Вказані режими реалізуються за допомогою рушійно-стернового комплексу (РСК) судна, який зазвичай, складається з гребного гвинта у насадці, що приводиться в рух електричним чи тепловим двигуном. Іншими варіантами побудови РСК є водометний рушій, вектор тяги якого регулюється за допомогою сопла, або спеціальне вітрило (БНС-вітрильник) [169].

Крім завдань автоматизації керування рухом БНС, актуальними є також завдання автоматизованого чи автоматичного керування його палубними механізмами – спуско-піднімальними пристроями (СПП) для групи АНПА.

Таким чином, забезпечення функціонування БНС відноситься до завдань комплексної автоматизації нелінійного морського рухомого об'єкта, що працює в умовах невизначеності характеристик зовнішнього середовища (ЗС) і нестационарності власних параметрів. Успішний розв'язок такого завдання можливий лише з широким застосуванням сучасних здобутків у галузі штучного інтелекту та математичного моделювання нелінійних динамічних об'єктів.

Узагальнена функціональна структура схема системи автоматичного керування таким БНС показана на рис. 4.4 [170].

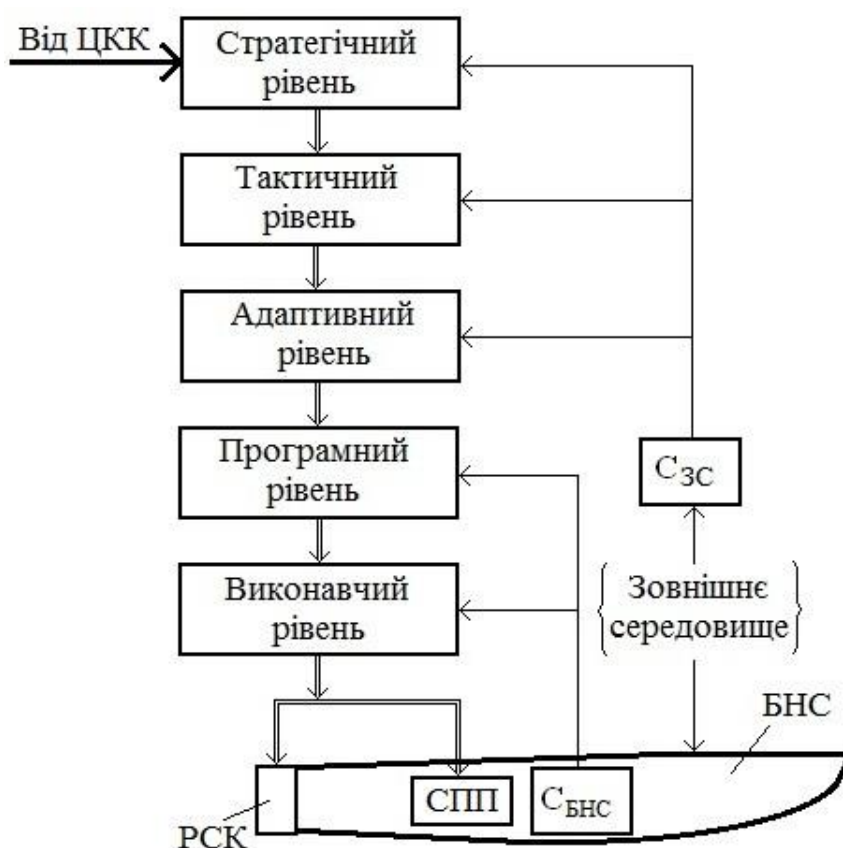


Рисунок 4.4 – Узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування БНС

Три верхні рівні приймають і обробляють завдання від зовнішнього (берегового чи мобільного) центру керування та контролю (ЦКК) з використанням інформації від системи сенсорів БНС $C_{БНС}$ та системи сенсорів $C_{ЗС}$ зовнішнього середовища. Вказані системи сенсорів генерують інформацію про поточні параметри та технічний стан механізмів БНС і параметри морського середовища.

Таким чином, верхній рівень – це рівень ухвалення рішення або допомоги людині в постановці завдання та у первинній постановці цілей функціонування об'єктів керування. У найближчій перспективі найбільш важливі функції цього рівня залишаються за людиною. У перспективі, як вважають науковці, розв'язок завдань цього рівня може бути виконане без участі людини за допомогою "сильного" штучного інтелекту.

Два нижніх рівні генериують керуючі команди для виконавчих механізмів БНС – його РСК і КВ. Для них джерелами команд є сигнали від верхніх рівнів керування, а також сигнали системи контролю за "внутрішніми" змінними - станом виконавчих механізмів БНС.

При цьому стратегічний рівень аналізує завдання, що надійшло від ЦКК, і планує загальне функціонування БНС для його виконання з урахуванням параметрів зовнішнього середовища.

Тактичний рівень управляє реалізацією стратегічного плану – розробляє траєкторію просторового переміщення, формує черговість операцій (рухів) у відповідності зі стратегією функціонування БНС та з урахуванням зовнішніх збурень.

Адаптивний рівень коригує рішення тактичного рівня з урахуванням фактичного стану зовнішнього середовища, здійснює пошук оптимальних управлінських рішень у рамках обраної тактики виконання завдання, що надійшло від ЦКК.

Програмний рівень розглянутої системи керування реалізує окремі типові операції – елементарні переміщення БНС та роботу КВ. Це досягається застосуванням заздалегідь інстальованих керуючих програм, які здійснюють, у загальному випадку, групове керування виконавчими механізмами БНС та його корисного вантажу.

На цьому рівні виконується аналіз інформації про середовище та умов функціонування БНС, формування послідовності базових операцій та контроль їх виконання для рішення поставленої верхнім рівнем завдання (вибір шляхів руху, траєкторій руху виконавчих органів та ін.).

Виконавчий рівень реалізує керування окремими виконавчими механізмами у режимах стабілізації руху, роботи з КВ, збору інформації про зовнішнє середовище та ін.

Поза залежністю від границь рівнів системи керування при побудові БНС необхідна інтеграція всіх рівнів керування, зокрема, використання єдиного механізму обміну даними й програмування всіх рівнів (кросплатформності).

Функціонування БНС передбачає наступні режими автоматичного керування [171]:

- автоматичне діагностування R_{DI} механізмів, вузлів і систем БНС перед початком виконання місії;
- автоматичний вихід R_{BI} з бази до початкової точки маршруту заданої місії;
- автоматичний рух БНС по заданій траєкторії R_{TI} під час переходу у робочу зону акваторії;

- автоматичне маневрування R_M у робочій зоні акваторії та/чи автоматична стабілізація R_S у заданій точці заданої акваторії;
- автоматичний рух БНС R_{T2} по траєкторії повернення у кінцеву точку маршруту місії;
- автоматичне повернення R_{B2} до бази;
- автоматичне діагностування R_{D2} механізмів, вузлів і систем БНС після завершення місії.

Таким чином, множина $R_{БНС}$ основних режимів функціонування БНС містить наступні елементи:

$$R_{БНС} = \{R_{D1}; R_{B1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}; R_{D2}\}. \quad (4.7)$$

Очевидно, що для всіх основних режимів роботи БНС, крім режимів R_{D1} та R_{D2} , характерним є наявність дії зовнішніх збурень $\vec{F}_{EP}$ у вигляді векторів сил вітру $\vec{F}_{Wn}$, хвиль $\vec{F}_{Wv}$ та течії $\vec{F}_V$.

До головних задач САК БНС слід віднести наступні задачі:

- задача безпечної навігації БНС у режимах руху $\{R_{B1}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}\}$; тут має передбачатись, крім дії зовнішніх збурень $\vec{F}_{EP}$, наявність навігаційних перешкод у вигляді інших плавзасобів;
- задача автоматичного керування головною силовою установкою (ГСУ) БНС (дизелем чи іншим джерелом механічної чи електричної енергії БНС);
- задача автоматичного керування рушійно-стерновим комплексом (РСК) БНС;
- задача автоматичного керування допоміжними судновими машинами і механізмами (ДСММ) БНС;
- задача автоматичного керування корисним вантажем (КВ) БНС;
- задача автоматичної діагностики (контролю працездатності) обладнання (ДО) БНС (режими R_{D1} та R_{D2}).

Очевидно, що такий складний перелік вимог, що висувуються до САК БНС, можливо задовольнити лише шляхом застосування сучасних принципів і технологій побудови систем керування.

Більшістю дослідників визнають необхідність використання багаторівневої (ієрархічної) структури побудови інтелектуальних систем керування рухомими об'єктами. Успішне рішення завдань керування такими об'єктами можливо при побудові ефективного керування на кожному з рівнів і не менш ефективному їх комплексуванні.

Розглянемо особливості побудови інтелектуальних САК БНС, які ґрунтуються на принципах багаторівневої структури згідно рис. 4.4.

Сам розподіл на рівні є досить умовним і в значній мірі залежить від конкретної реалізації БНС. У якості основної класифікаційної ознаки при виділенні рівнів керування БНС використовують властивості об'єктів (складових БНС), керування якими реалізується на відповідному рівні.

Тоді узагальнена структури САК рухом БНС в умовах дії зовнішніх збурень буде мати вигляд, показаний на рис. 4.5.

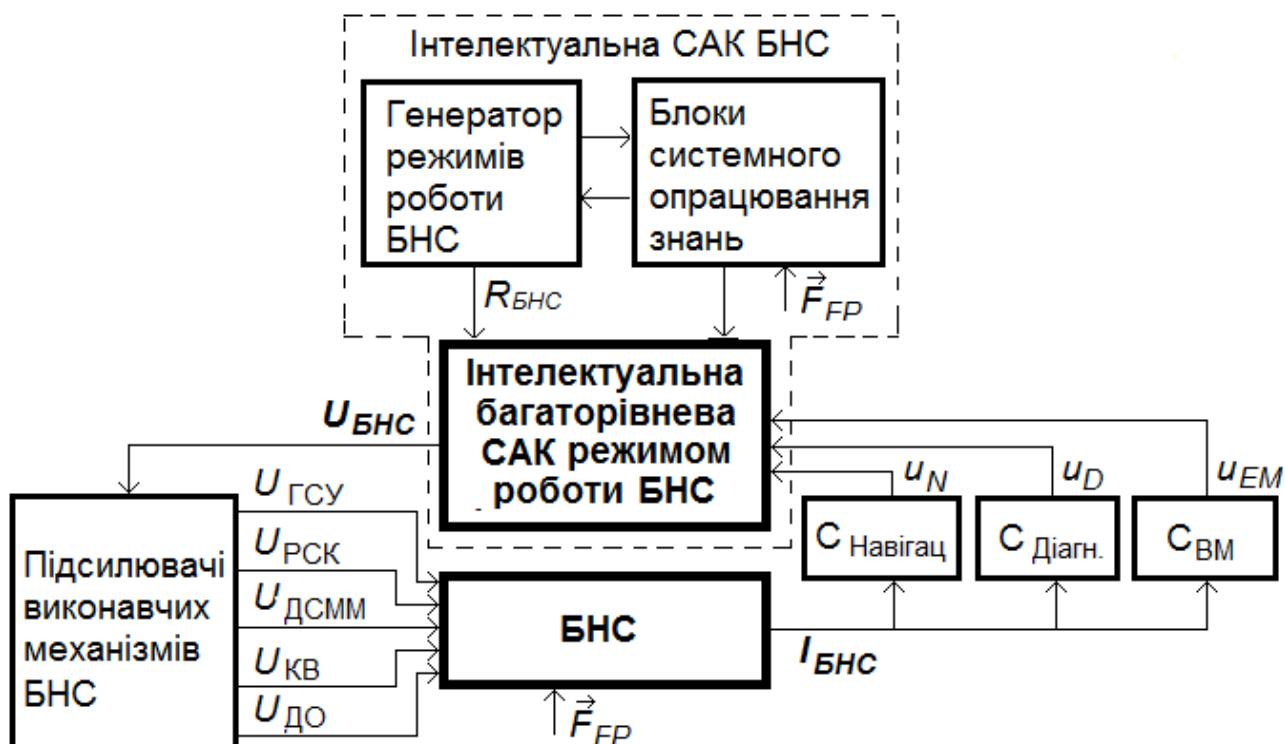


Рисунок 4.5 – Узагальнена структурна схема інтелектуальної САК рухом БНС

Розглянемо основні принципи роботи запропонованої інтелектуальної САК.

Генератор режимів роботи БНС – це програмний пристрій чи радіоканал, через який задається поточний режим роботи БНС згідно множині (4.7).

Блоки системного опрацювання знань призначені для аналізу зовнішньої обстановки (вектору $\vec{F}_{FP}$) на основі використання наступних інформаційних технологій – експертних систем, штучних нейронних мереж, нечіткої логіки, еволюційних методів і генетичних алгоритмів.

В основу концепції інтелектуальності, зазвичай, покладено:

- уміння системи працювати з формалізованими знаннями людини (експертні системи, нечітка логіка);
- властиві людині способи навчання і мислення (нейронні мережі, генетичні алгоритми).

САК режимом роботи БНС реалізує заданий режим роботи судна, у результаті чого формується множина $U_{БНС}$ сигналів керування виконавчими механізмами БНС. Після підсилення генерованих САК сигналів керування ГСУ, РСК, ДСММ, КВ та ДО (відповідно, сигнали $U_{ГСУ}$, $U_{РСК}$, $U_{ДСММ}$, $U_{КВ}$ та $U_{ДО}$) вони надходять до відповідних виконавчих механізмів БНС і, таким чином, забезпечують виконання заданого йому режиму функціонування.

Вихідними сигналами БНС є множина інформаційних сигналів $I_{БНС}$, які характеризують поточний стан БНС як об'єкту керування.

Важливою складовою САК є система сенсорів, яка складається з трьох груп:

- навігаційних сенсорів $C_{\text{Навігац.}}$, які забезпечують САК інформацією про поточні навігаційні характеристики БНС (курс, швидкість, географічні координати, а також їх похідні);
- діагностичні сенсори $C_{\text{Діагн.}}$, які дають інформацію про технічний стан виконавчих вузлів, механізмів і систем БНС;
- сенсори $C_{\text{ВМ}}$ виконавчих механізмів БНС, які утворюють зворотній зв'язок для САК по керованим величинам БНС як об'єкту керування.

Множина сигналів сенсорів u_N , u_D та u_{EM} утворюють необхідні канали зворотного зв'язку, необхідного для ефективної роботи САК в основних режимів роботи згідно (4.7).

Таким чином, запропонована САК БНС реалізує два узагальнені принципи інтелектуального керування:

- керування на основі аналізу зовнішніх даних ситуацій та подій (ситуаційне керування з урахуванням впливів $\vec{F}_{FP}$);
- використання сучасних інформаційних технологій для обробки даних та знань.

Наведені вище узагальнена функціональна схема та узагальнена структурна схема інтелектуальної САК рухом БНС враховують основні особливості БНС як об'єкту автоматичного керування і можуть слугувати основою для подальшого синтезу системи автоматичного керування БНС як носія групи АНПА в умовах невизначеності зовнішніх збурень.

4.4 Система автоматичного керування курсом БНС

Традиційно система автоматичного керування рухом судна по курсу (автостерновий) вирішує наступні завдання [172]:

- стабілізацію – автоматичне утримання судна на заданому курсі;
- маневрування – достатньо точне і швидке виконання отриманих команд (керуючих впливів).

Для реалізації завдання автоматичної стабілізації судна на курсі найчастіше використовується ПІД-регулятор [173]:

$$\delta_A = k_1 \frac{d\psi}{dt} + k_2 \psi + k_3 \int_0^t \psi \cdot dt, \quad (4.8)$$

де δ_A - обчислений кут перекладання стерна РСК; ψ - відхилення судна від заданого курсу; $k_{1,2,3}$ - коефіцієнти регулятора.

Принцип роботи САК курсом судна за допомогою автостернового показаний на рис. 4.6.

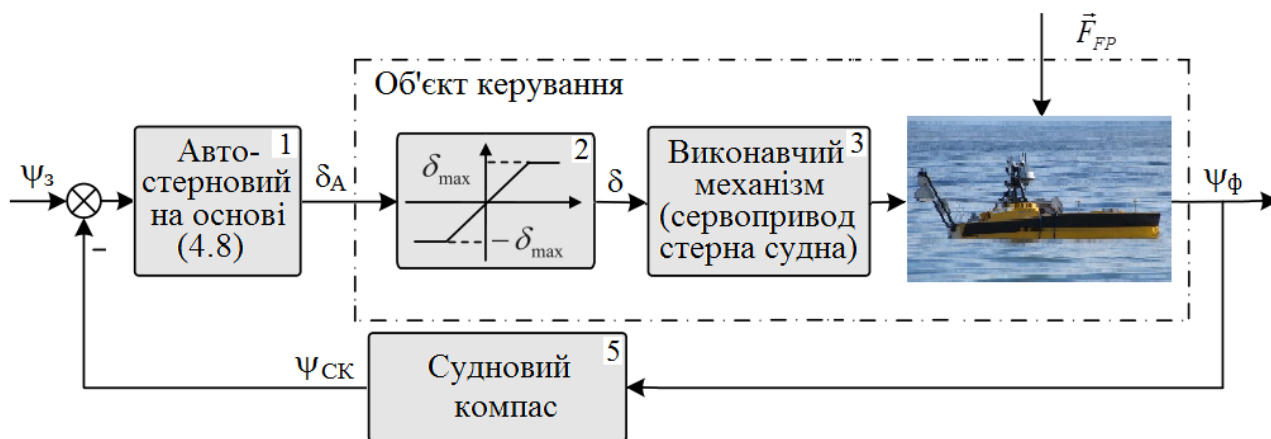


Рисунок 4.6 – Принцип роботи САК курсом судна

На рисунку позначено: ψ_z , ψ_{ϕ} , $\psi_{СК}$ – відповідно, заданий, фактичний та виміряний судновим компасом курсові кути судна; δ_c, δ_{ϕ} – відповідно, обчислений та фактично заданий для виконавчого механізму БНС (сервопривода) кут перекладки стерна; $\vec{F}_{FP}$ – вектор зовнішніх збурень, які діють на БНС.

Для БНС як носіїв АНПА важливим режимом автономного функціонування, крім стабілізованого руху визначеним курсом R_{B1} , є також режими руху по заданій траєкторії R_{T1} та R_{T2} згідно множини (4.7). З розвитком електронної навігації (e-Navigation, [174]) актуальність розробки систем автоматичного керування траєкторним рухом БНС тільки зростає.

Успішний розв'язок вказаної задачі радикально змінює ефективність автоматизованого судноводіння та є альтернативою завданню стабілізації на курсі, підвищує рівень автоматизації і безпеки мореплавання, забезпечує економію енергоресурсів БНС і зменшує навантаження на рульовий привод судна, оскільки зменшує число перекладок стерна.

При русі по заданій траєкторії основною регульованою величиною є бічне відхилення центру тяжіння судна η від заданої лінії шляху.

Бічне відхилення обчислюється за даними счислення і сигналами від засобів навігації, що безперервно виробляють координати судна. Заданий маршрут вводять в систему у вигляді координат початкової і кінцевої точок прямолінійних відрізків бажаної траєкторії, знятих з навігаційної карти.

На основі безперервних даних про поточне місце судна (точка M на рис. 4.7) система виробляє значення відхилення η .

Закон керування в завданні стабілізації на траєкторії будують у вигляді лінійної функції від: $\Delta\psi$ — відхилення курсу від курсового кута ділянки траєкторії; ω_z - кутової швидкості рискання; η - бічного відхилення від траєкторії і інтеграла від нього, що є, по суті, ПД-регулятором по η з урахуванням того, що комбінація $\Delta\psi$ і ω_z може інтерпретуватися з деяким наближенням як похідна η .

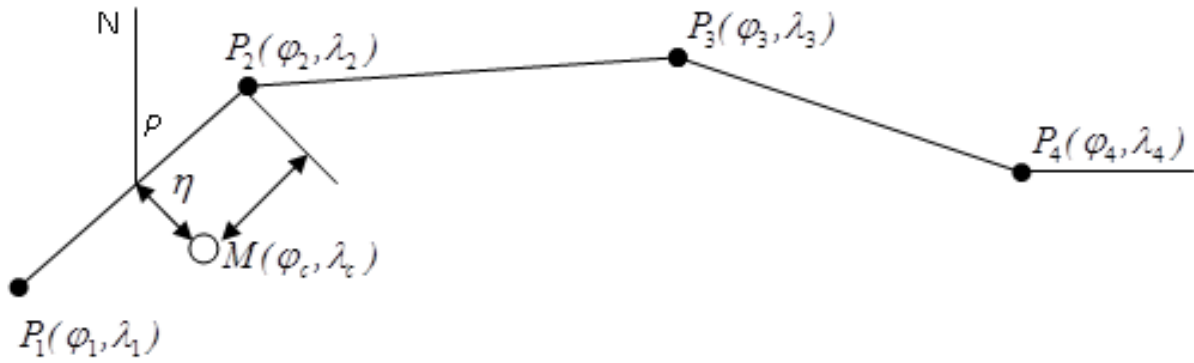


Рисунок 4.7 – До питання стабілізації судна на траєкторії

Сигнал керування u_l такого ПД-регулятора на кожен момент l дискретного часу визначається наступним співвідношенням [175]:

$$u_l = -[s_1(\psi_l - \Delta\psi_l) + s_2\omega_{zl}] \quad (4.9)$$

де $\Delta\psi_l$ – поправка до курсу заданому, обчислювана за формулою

$$\Delta\psi_l = s_3\eta_l + s_4 \sum_{i=1}^K \eta_i \quad (4.10)$$

де $s_{1,2,3,4}$ – коефіцієнти управління.

Вимірювання координати η , формоване по координатах місцеположення – широті φ_c і довготі λ_c (координати обсервацій) та по відомих параметрах локсодромічної ділянки, заданої координатами початкової точки φ_0, λ_0 і курсовим кутом P , визначаються формулою (еліпсною Землі нехтують) [175]:

$$\eta = \left\{ -\ln \left[\frac{(\operatorname{tg} \varphi_c / 2 + \pi / 4)}{(\operatorname{tg} \varphi_0 / 2 + \pi / 4)} \right] \sin P + (\lambda_c - \lambda_0) \cos P \right\} R \cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_c}{2} \right) \quad (4.11)$$

де R – радіус Землі, або спрощеною формулою

$$\eta = R \left\{ (\varphi_c - \varphi_0) \sin P + (\lambda_c - \lambda_0) \cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_c}{2} \right) \cos P \right\}. \quad (4.12)$$

Цей перехід здійснений з урахуванням умови малої довжини локсодромічної ділянки (не більше 50 миль); при цьому в широтах не більше 70°N погрішність, що вноситься, в якнайгіршому випадку (широта рівна 70°N) складає не більше 15 м.

4.5. Вдосконалення системи керування рухом БНС при стабілізації на траєкторії

При розв'язку задачі стабілізації судна на траєкторії керування здійснюється згідно із законом (4.9). При цьому бічне відхилення розраховується за залежностями (4.11) чи (4.12). У цих залежностях точність обчислення поточних координат БНС φ_c, λ_c визначає точність визначення його бічного відхилення. Таким чином, при стабілізації судна на траєкторії вирішальним питанням є точне і безперервне визначення місця судна.

Оптимальне керування судном відповідно до приведеного закону забезпечується автостерновим (АС) на тихій воді і при помірному хвилюванні. Досвід експлуатації автостернових показує, що при хвилюванні, більшому за 3-х бали, необхідним є перенастроювання параметрів АС, оскільки досягнення заданої точності керування супроводжується перевантаженням стернового приводу. При великому хвилюванні, зазвичай, переходять на ручне керування, при якому людина-стерновий, виходячи зі свого досвіду, ступінчасто перекладає стерно, руляючи курс судна тільки при значних його відхиленнях від заданої траєкторії. Цим досягається зменшення числа переключень стерна і забезпечується надійна робота стернового приводу, забезпечується підвищення ефективності керування судном у цілому.

Виходячи з аналізу функцій керування рухом при стабілізації на траєкторії і особливостей БНС, вимог до їх систем навігації та керування, а також з аналізу сучасного стану і тенденцій розвитку приладів, систем навігації і керування рухом суден, пропонуються наступні напрями вдосконалення системи керування рухом БНС при стабілізації її на траєкторії [176-178]:

- розробка структури системи керування БНС підвищеної точності, яка включає інтегровану систему орієнтації і навігації (ІСОН) з мінімальним складом малогабаритних навігаційних приладів низької вартості і автостерновий з нечітким регулятором для підвищення ефективності стабілізації БНС на траєкторії;

- обґрунтування складу, розробка структури, моделі і алгоритму функціонування ІСОН, дослідження особливостей її роботи і ефективності застосування при стабілізації БНС на траєкторії;

- розробка нечіткого регулятора АС з метою зменшення числа переключень стерна і дослідження його ефективності при стабілізації БНС на траєкторії.

Як вирішення першого напрямку досліджень пропонується наступна структура системи керування рухом БНС (рис. 4.8).

При стабілізації судна на траєкторії задані маршрути руху введені до ЕКНС і зберігаються в базі даних. На підставі інформації про поточне місцеположення БНС з підвищеною точністю, яку виробляє ІСОН, і даних про маршрути, САК виробляє сигнал керування згідно з (4.9), який подається на АС з нечітким регулятором для керування рухом судна по заданому закону.

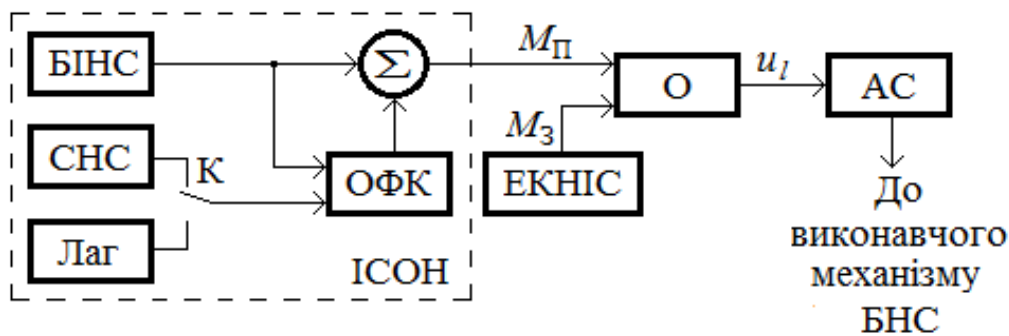


Рис. 4.8 – Структура системи керування рухом БНС: БІНС – безплатформна інерціальна навігаційна система; СНС – приймач супутникової навігаційної системи; ЕКНІС – електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система; К – комутатор, який підключає інформацію від лага БНС у випадку тимчасової відсутності сигналу від СНС; О – обчислювальний пристрій; АС – автостерновий БНС, ОФК – оптимальний фільтр Калмана

Сьогодні БІНС будуються на малогабаритних датчиках, які мають невелику вартість, що відповідає вимогам до малорозмірних БНС. Для корекції помилок БІНС у виробленні навігаційних параметрів залучають дані від приймача СНС і суднового лага, які встановлені на більшості суден. ІСОН виконує комплексну обробку інформації з різних джерел і генерує поточні навігаційні параметри БНС з високою точністю.

Підвищення точності стабілізації БНС на траєкторії і зниження числа переключень стерна підвищує ресурс АС. Це досягається за допомогою нечіткого регулятора, який синтезовано на основі залучення досвіду групи експертів, що мають практичний досвід керування суднами у штормових умовах.

Для реалізації двох наступних напрямів досліджень необхідно виконати наступне:

- розробити структуру ІСОН БНС, яка складається з безплатформної інерційної навігаційної системи (БІНС), приймача супутникової навігаційної системи і лага;
- розробити математичні моделі помилок і алгоритми функціонування ІСОН на основі оптимальної обробки навігаційної інформації за допомогою оптимального фільтра Кальмана;
- розробити структуру, математичну модель і алгоритми роботи нечіткого регулятора для стабілізації БНС на траєкторії з метою оптимізації числа переключень рулюючи в умовах морського хвилювання;
- дослідити ефективність застосування розробленої ІСОН при стабілізації БНС на траєкторії;
- дослідити ефективність застосування нечіткого регулятора АС для керування рухом БНС при стабілізації на траєкторії в умовах морського хвилювання методами математичного моделювання та натурального експерименту.

Вказані напрямки утворюють наступний етап досліджень та синтезу ефективних систем автоматичного керування БНС.

4.6 Методи забезпечення безпеки плавання БНС

Очевидно, що для безпеки мореплавства БНС повинно бути оснащено системою автоматичного керування, здатною заздалегідь виявляти навігаційні перешкоди, які знаходяться або можуть виникнути на траєкторії його руху та активно від них ухилятися. Важливо, щоб процес ухилення від перешкод завершувався відновленням виконання основного завдання. Для цього необхідно оснастити САК БНС:

- системою сенсорів для ефективного виявлення надводних/підводних перешкод;
- надійною та продуктивною обчислювальною технікою та периферією;
- програмним забезпеченням, яке на основі інформації від сенсорів про оточуючу обстановку та про мету місії здатне генерувати адекватні команди виконавчим пристроям судна.

Найбільш ефективними на даний час сенсорними системами БНС вважаються радіолокаційні станції (РЛС) для освітлення надводної обстановки та гідроакустичні станції (ГАС) для освітлення підводного середовища. Можливо використання також лідарів (лазерних сканерів) і систем технічного зору у різних оптичних діапазонах. Ці сенсорні системи повинні задовольняти низці умов, але головними є дальність виявлення, роздільна здатність по дальності та роздільна здатність по куту на перешкоду.

Загальний алгоритм роботи системи автоматичного керування рухом БНС з врахуванням необхідності забезпечення безпеки мореплавства приведений на рис. 4.9 [179].

В даному алгоритмі в логічній умові виконується оперування з абстрактною величиною «небезпечна зона». Це величина, яку можна визначити, враховуючи швидкість руху об'єкта, що знаходиться поряд з БНС, так і швидкість самого БНС. Необхідними складовими для врахування також являються дистанція та пеленг до об'єкта або перешкоди. Таким чином, під поняттям «небезпечна зона» розуміється площа акваторії, в якій знаходиться навігаційно небезпечний об'єкт, що утворює потенційну загрозу зіткнення.

Показаний на рис. 4.9 алгоритм можна спростити, якщо вважати, що загрози можуть бути тільки рухомими. Нерухомі морські об'єкти (наприклад, буї, скелі, опори) можуть створювати небезпеку, якщо БНС само рухається на них. Тому в алгоритмі на рис. 4.9 можна виключити блоки, що виділені кольором.

На рис. 4. 10 представлено діаграму визначення рівня небезпеки при русі (дрейфі, позиціюванні) БНС. На діаграмі концентричними пунктирними кільцями відображені дистанції виявлення перешкод «Д-1» – дальня, «Д-2» – середня та «Д-3» – ближня відносно БНС.

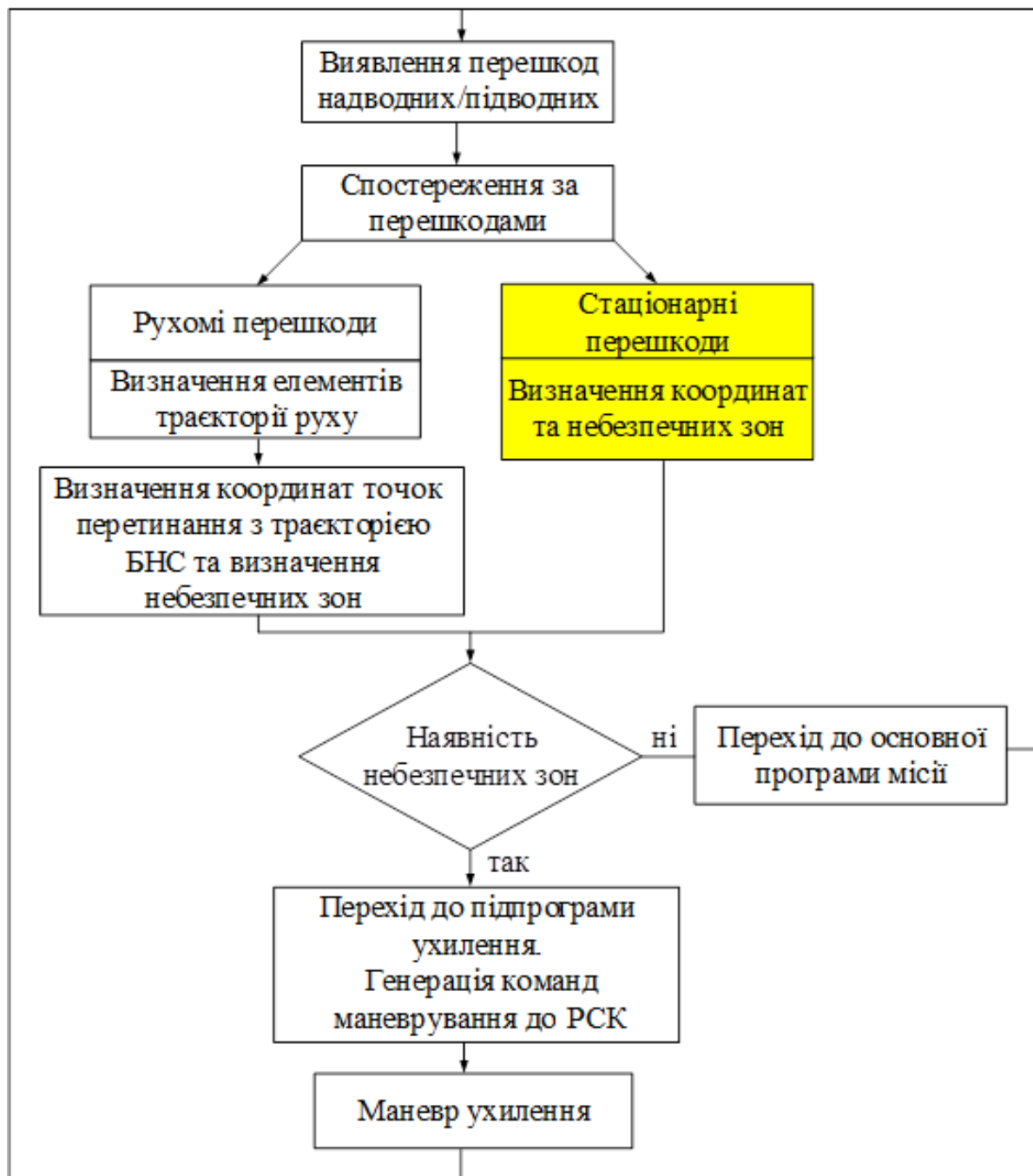


Рис. 4.9 – Варіант алгоритму забезпечення безпеки мореплавства БНС

Також на діаграмі задані сектори (напрямки) виявлення перешкод відносно БНС – «прямо по курсу» або «за кормою», які на діаграмі позначені відповідно «0» і «К».

Сектор «прямо по курсу» розбито ще на два підсектори з кутом розкриття 10° «ЛО» та «ПО».

З бокових проекцій виділено по два підсектора: зліва по курсу – «Л1», зліва по борту – «Л2», праворуч по курсу – «П1» та праворуч по борту – «П2».

Сектори «Л1», «П1» мають кут розкриття 65° , «Л2», «П2», мають кут розкриття 70° , «КЛ» і «КП» мають кут розкриття 35° .

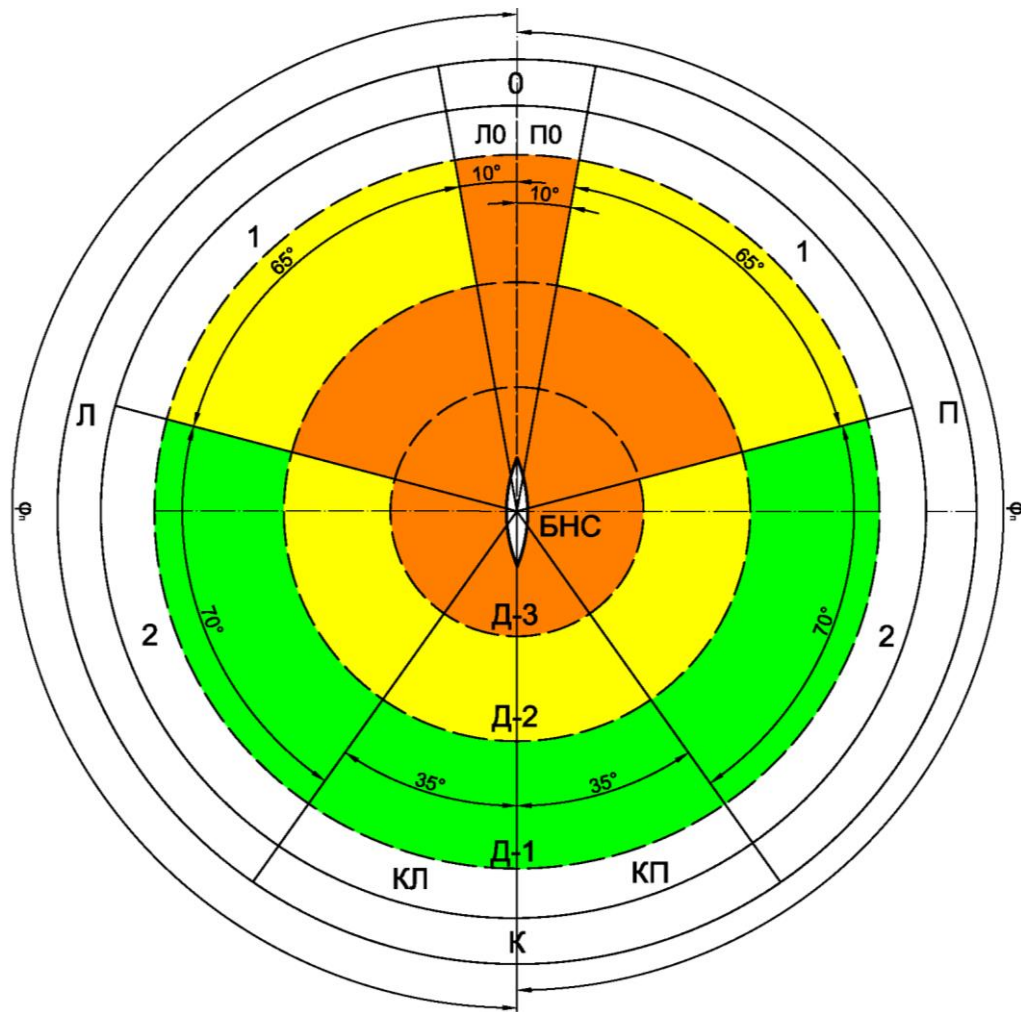


Рис. 4.10 – Визначення рівня небезпеки перешкод навколо БНС

Рівень загрози зіткнення (рівень небезпечності) має три градації, які на діаграмі позначені помаранчевим, жовтим та зеленим кольорами.

Рівень небезпеки вважаємо таким, що збільшується від зеленого до помаранчового.

Діаграма, що показана на рис. 4.10, може мати інший вигляд в залежності від режиму роботи БНС, його швидкості або інших параметрів (стан погоди, хвилювання моря, наявність течії та інше).

Тобто,

$$R_j = f(V, G, W, \dots), \quad (4.13)$$

де R_j – радіус виявлення перешкод (Д-1, Д-2, Д-3); V – швидкість БНС; G – сила хвилювання (наприклад, за шкалою, розробленою Всесвітньою метеорологічною організацією); W – сила вітру (наприклад, за шкалою Бофорта).

Крім того, положення БНС на діаграмі рис. 4.10 також може регулюватись.

У відповідності до рис. 4.10 можна визначити поведінку САК, яка б вважалась відповідною рівню небезпеки. При цьому справедливі наступні залежності при русі БНС по відношенню до перешкоди:

$$\Delta l = l_{i-1} - l_i, \quad (4.14)$$

де Δl – відхилення радіус-вектору (дистанції) до перешкоди в проміжок часу, $\Delta t = t_{i-1} - t_i$; l_{i-1} – радіус-вектор (дистанція) до перешкоди – попереднє значення; l_i – радіус-вектор (дистанція) до перешкоди – поточне значення.

Швидкість зміни дистанції (табл. 4.1):

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_{i-1} - l_i}{t_{i-1} - t_i}. \quad (4.15)$$

Таблиця 4.1 – Умови визначення положення перешкоди відносно БНС по даним відхилення дистанції

Якщо	$\Delta l > 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} \geq 0,$	то перешкода наближається з постійною швидкістю або прискорено
Якщо	$\Delta l = 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} = 0,$	то перешкода рухається паралельно або як сателіт
Якщо	$\Delta l < 0, \frac{\Delta l}{\Delta t} \leq 0,$	то перешкода віддаляється з постійною швидкістю або прискорено

Необхідно також враховувати пеленг на перешкоду відносно власного курсу:

$$\Delta \varphi = \varphi_{i-1} - \varphi_i, \quad (4.16)$$

де $\Delta \varphi$ – зміна кута утвореного вектором руху БНС $\vec{V}$ та радіус-вектором $\vec{l}$ (дистанцією) на перешкоду в проміжок часу $\Delta t = t_{i-1} - t_i$; φ_{i-1} – попереднє значення кута утвореного вектором руху БНС $\vec{V}$ та радіус-вектором $\vec{l}$ на перешкоду; φ_i – поточне значення кута утвореного вектором руху БНС $\vec{V}$ та радіус-вектором $\vec{l}$ на перешкоду.

Кутова швидкість зміни напрямку на перешкоду (табл. 4.2):

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{t_{i-1} - t_i}. \quad (4.17)$$

Відповідне графічне уявлення по даним табл. 4.1 та 4.2 про переміщення перешкоди відносно БНС приведено на рис. 4.11.

Таблиця 4.2 – Умови визначення положення перешкоди відносно БНС по даним відхилення кута напрямку на перешкоду

Якщо	$\Delta\varphi > 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \geq 0,$	то перешкода випереджає БНС і рухається з постійною швидкістю або прискорено
Якщо	$\Delta\varphi = 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = 0,$	то перешкода рухається паралельним курсом
Якщо	$\Delta\varphi < 0, \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \leq 0,$	то перешкода відстає від БНС і рухається з постійною швидкістю або уповільнюється

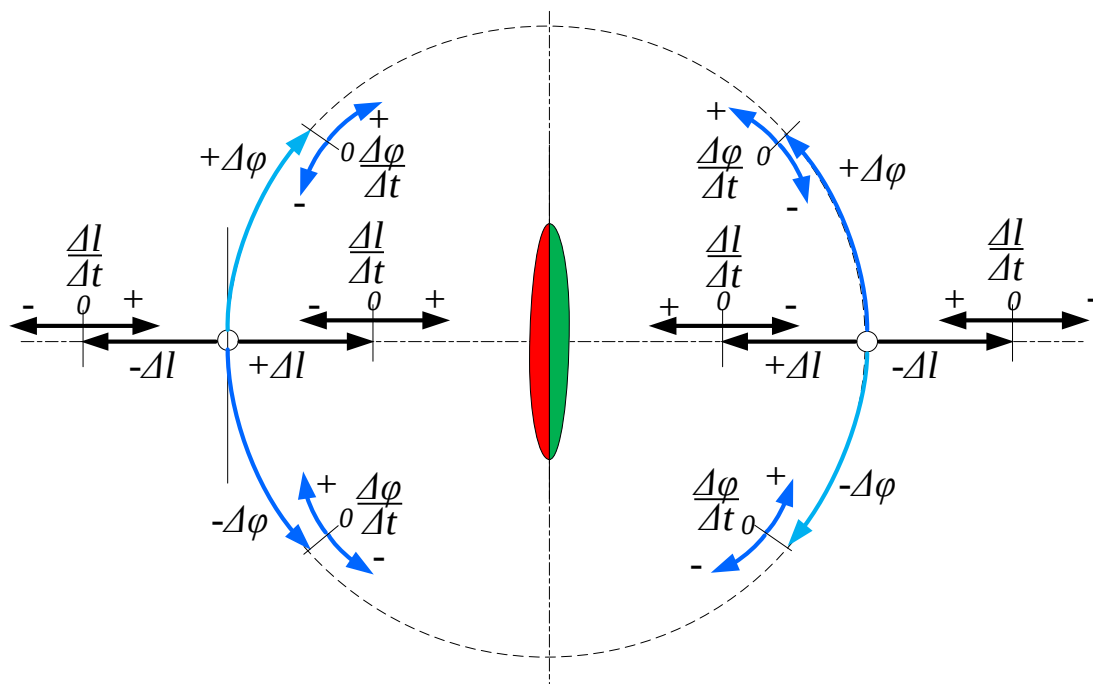


Рис. 4.11 – Графічна інтерпретація визначення напрямку руху перешкоди відносно БНС по відхиленню дистанції та кута напрямку на перешкоду

Основним критерієм визначення реакції САК на рівень небезпеки з визначеними параметрами її руху є маневр БНС в протилежну сторону з відповідною швидкістю. Реакція САК може бути визначена експертним методом з їх уточненням на математичних моделях САК, БНС, навколишнього середовища та моделей перешкод. Найбільш придатними САК для обчислення представлених положень є системи на основі нечітких або нейро-нечітких контролерів [82].

Інтенсивність судноплавства на морських шляхах, поблизу портів та морських баз, як і у фарватерах річок, каналах, протоках, досить висока. Тому необхідною умовою забезпечення безпеки мореплавства є здатність САК виявляти, супроводжувати та реагувати одночасно на декілька перешкод, як надводних, так і підводних. Це завдання утворює додатковий напрямок прикладних наукових досліджень.

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

5.1 Короткий опис організації морського натурного експерименту

5.1.1. Особливості проведення морського натурного 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 натурного 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 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. 5.1).

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

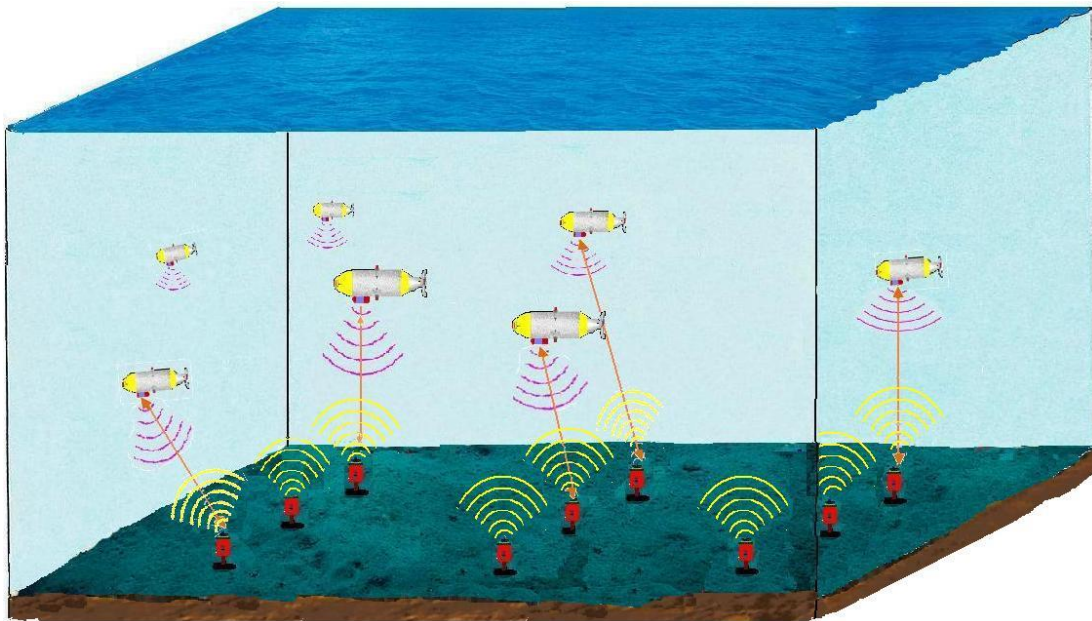


Рисунок 5.1 – Загальна схема проведення морського натурального експерименту

Тому нижче наведено короткий опис розробленої в НДІ підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова «Програми і методики проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи», яку було реалізовано на практиці в умовах фінансових обмежень [180].

5.1.2. 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. 5.2.

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.

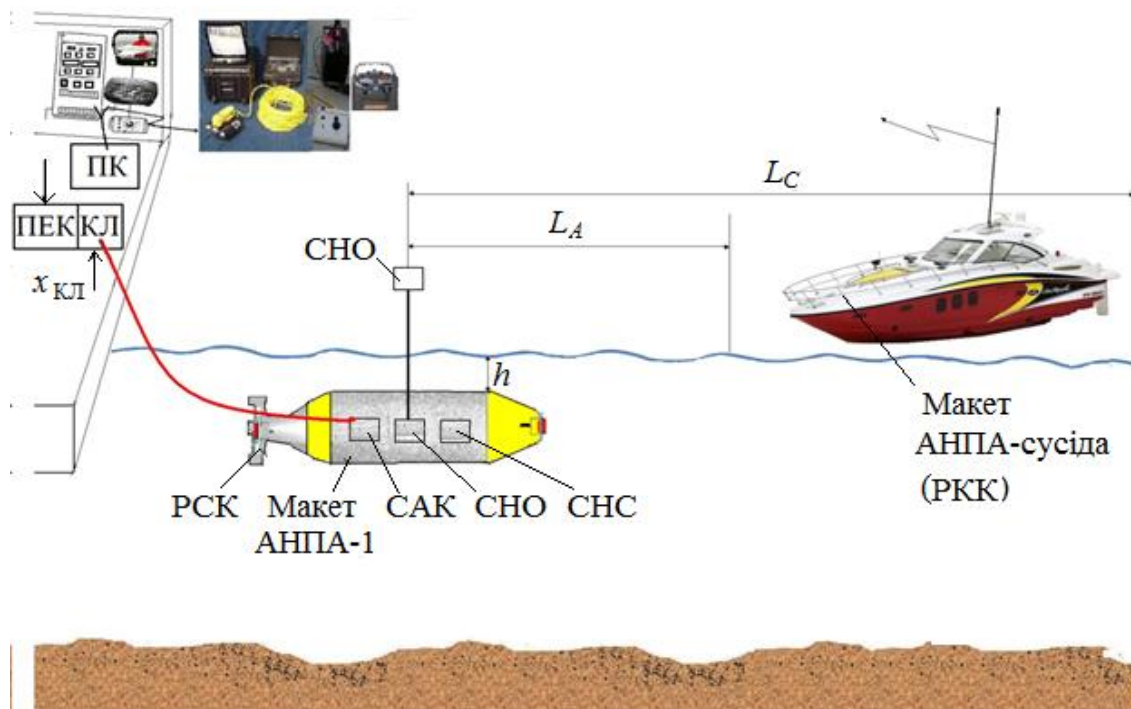


Рисунок 5.2 – Схема натурного випробування узгодженого руху двох АНПА

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. 5.3).



Рисунок 5.3 – Зовнішній вигляд СНО та її розташування на АНПА-1

У якості сенсорів СНО використано ультразвукові далекоміри моделі MB 1003-EZ0 виробництва фірми MaxBotix [181].

У якості АНПА-2 (АНПА-сусіда) використано надводний радіокерований катер (РКК), керований оператором вручну з пульта керування (ПК) [182]. Катер оснащений 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.

5.1.3. Короткий опис змісту морського натурного 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 натурного експерименту зображена на рис. 5.4.

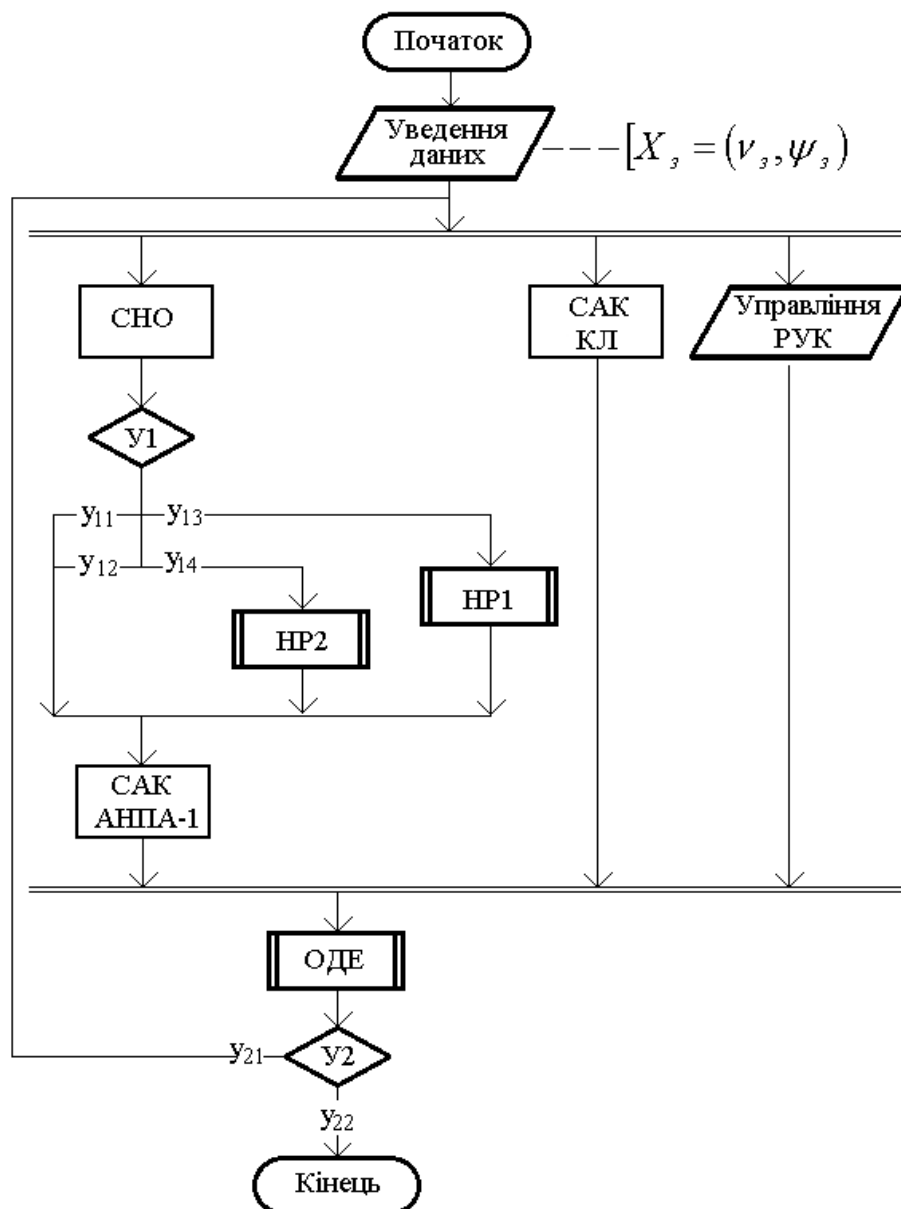


Рисунок 5.4 – Блок-схема узагальненого алгоритму проведення морського натурного експерименту

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 y_{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 y_{12}), АНПА-1 буде продовжувати прямолінійний рух заданим курсом;
- якщо об'єкт виявлено у зоні небезпеки «Danger Zone» (умова y_{13}), САК АНПА-1 буде реалізовувати режим адгезії (набір правил HP1), тобто керуючі впливи, сформовані САК, будуть спрямовані на збільшення дистанції до об'єкта;
- якщо об'єкт виявлено у зоні притягання «Attraction Zone» (умова y_{14}), САК апарата буде функціонувати в режимі когезії (набір правил HP2) 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 Y_2 завершення поточного випробування (відповідно, умови y_{21} і y_{22}).

5.1.4. 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. 5.5 наведено зовнішній вид лабораторного стенду, призначеного для визначення діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до морського натурального експерименту.

Лабораторний експеримент виконано згідно схеми, зображеної на рис. 5.6. Далі надається короткий опис процесу проведення експерименту.

Підводний апарат устатковується на видаленні h від сенсора таким чином, щоб його діаметральна площа була перпендикулярна прямій, проведеної 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.



Рисунок 5.5 – Стенд для визначення діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів: 1 – блок живлення; 2 – ультразвуковий далекомір моделі MB 1003-EZ0; 3 – осцилограф; 4 – макет АНПА-1

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.

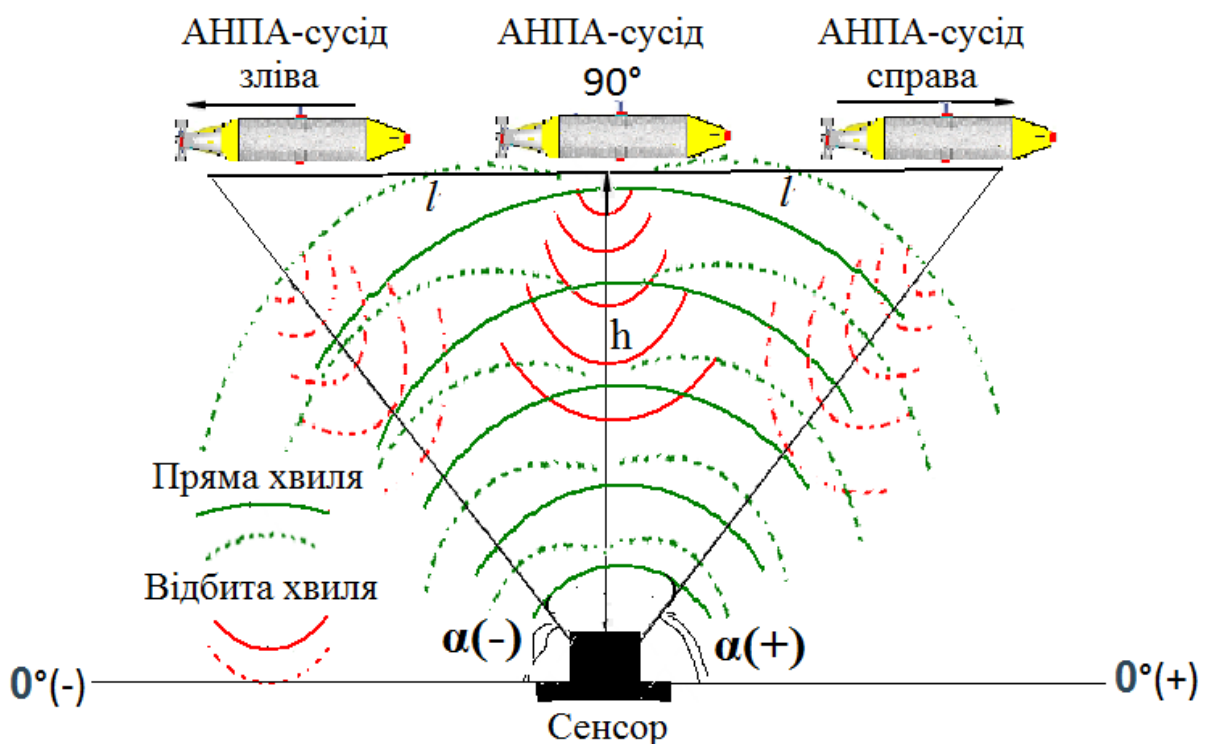


Рисунок 5.6 – Схема проведення лабораторного експерименту для зняття діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0

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. 5.1, а графічне подання діаграми спрямованості зображене на рис. 5.7.

Таблиця 5.1. Результати лабораторного дослідження

Сен- сор $h, \text{ м}$	Сенсор-1		Сенсор-2		Сенсор-3		Сенсор-4	
	$l(-), \text{ м}$	$l(+), \text{ м}$	$l(-), \text{ м}$	$l(+), \text{ м}$	$l(-), \text{ м}$	$l(+), \text{ м}$	$l(-), \text{ м}$	$l(+), \text{ м}$
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

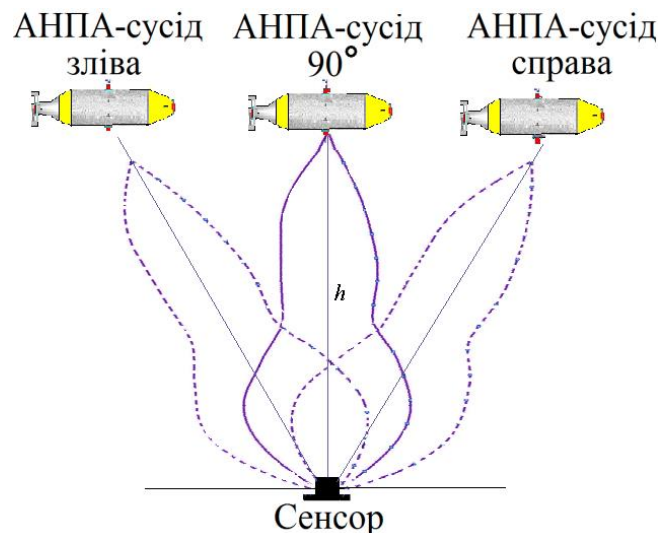


Рисунок 5.7 – Експериментально знята діаграма спрямованості

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.

5.1.5. Використання групи сенсорів для визначення положення АНПА-сусіда. Одночасне використання декількох сенсорів забезпечує більш точне визначення положення й швидкості АНПА.

Практика науково-дослідної лабораторії «Дельта» показує, що доцільним є використання 4 сенсорів для більшої ефективності при виявленні об'єктів.

На рис. 5.8 показано зовнішній вигляд 4-х сенсорів – ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до участі у морському натурному експерименті.

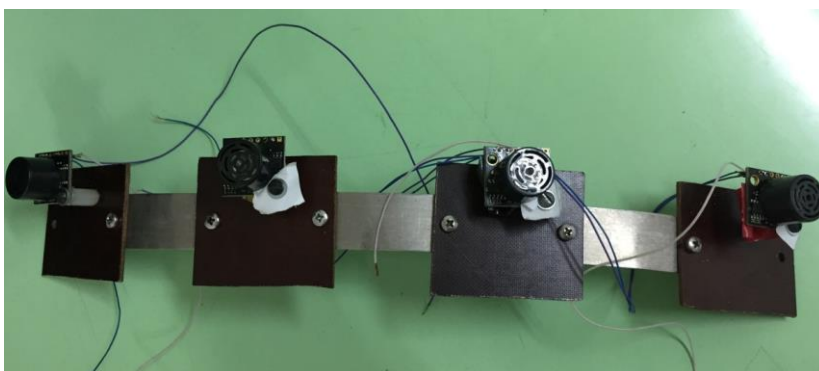


Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд групи ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до участі у морському натурному експерименті

Діаграми, отримані в табл. 5.1, об'єднано таким чином, щоб досягти максимально можливої ширини діаграми спрямованості системи без істотного зменшення максимальної дистанції розпізнавання об'єкта (рис. 5.9).

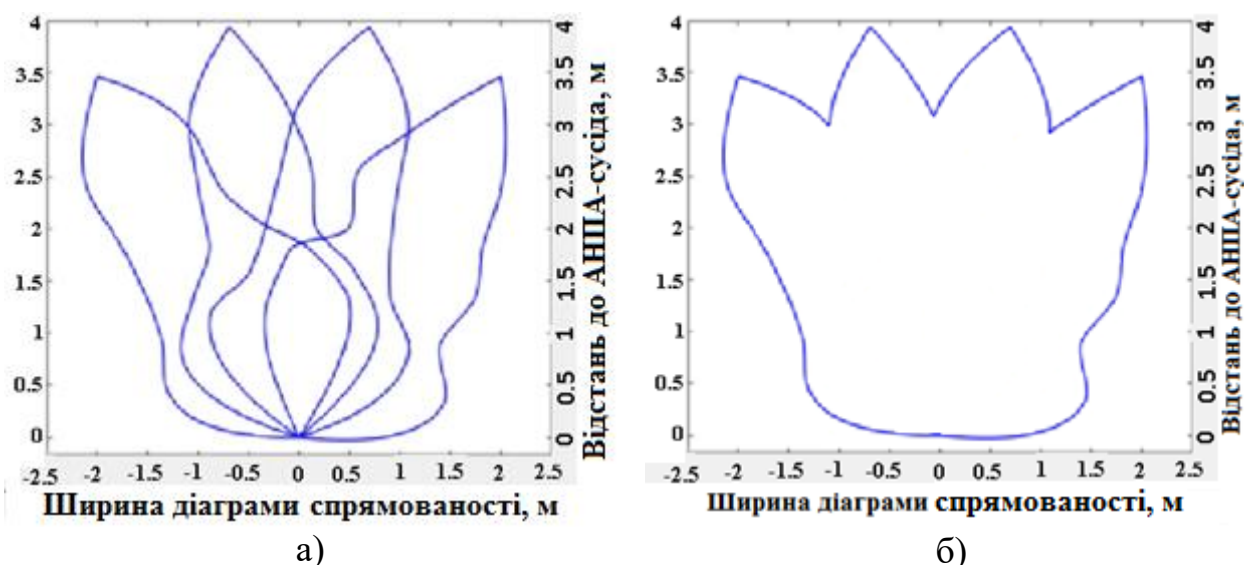


Рисунок 5.9 – Діаграма спрямованості чотирьох ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0: а) розташування сенсорів; б) результуюча діаграма

У якості такого судна було залучено науково-дослідне судно «Дельта» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

На рис. 5.10 показано фотофрагменти випробувань.



Рисунок 5.10 – 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

Морський натурний експеримент проводився згідно алгоритму, наведеному на рис. 5.4, 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.

5.2. Аналіз результатів морських натурних випробувань САК АНПА

Розглянемо результати експериментальної перевірки працездатності САК АНПА-1, отримані шляхом морських натурних випробувань.

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. 5.11.

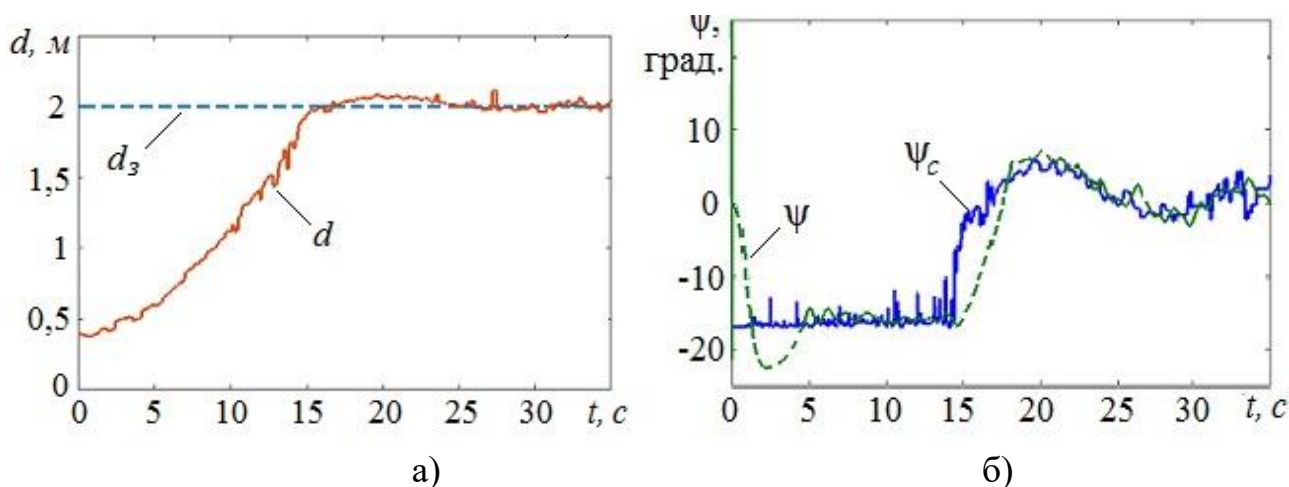


Рисунок 5.11 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії:

а) дистанція; б) керуючий вплив

При амплітуді задачі керування, рівній 1,5 м, перехідний процес має аперіодичний характер з перерегулюванням 6,7%. Тривалість перехідного процесу склала 25 с.

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. 5.12.

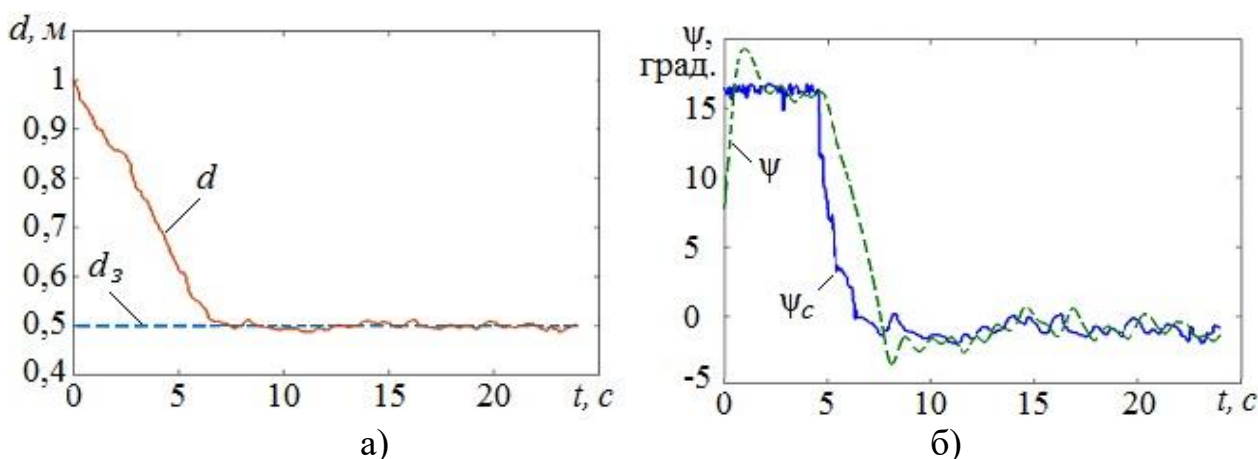


Рисунок 5.12 – Графіки перехідних процесів в режимі когезії:

а) дистанція; б) керуючий вплив

Перехідний процес також має аперіодичний характер. Перерегулювання склало 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. 5.13.

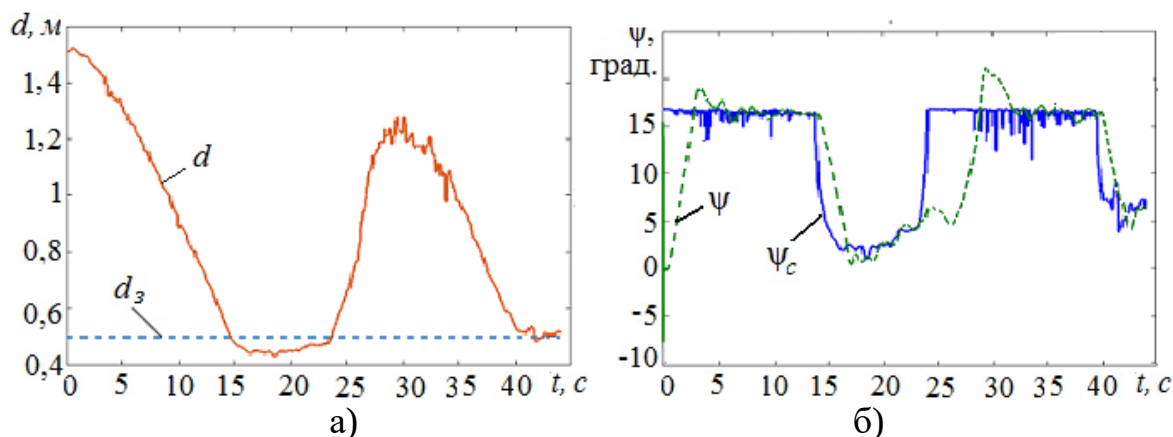


Рисунок 5.13 – Графіки перехідних процесів при дії зовнішніх збурень:
а) дистанція; б) керуючий вплив

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. 5.14).

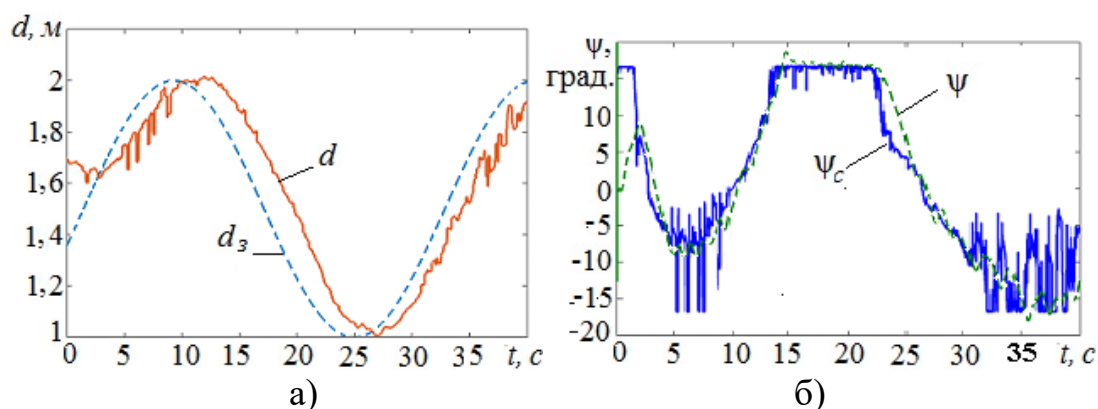


Рисунок 5.14 – Графіки перехідних процесів при гармонічному сигналі керування: а) дистанція; б) керуючий вплив

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

У монографії 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 монографії на основі аналізу сучасних підходів до групового керування автономних ненаселених підводних апаратів показано, що прикладну 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.

На основі аналізу існуючих методів автоматичного керування групою автономних ненаселених підводних апаратів, у монографії запропоновано перелік 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 наукові задачі 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;

- удосконалення процесів керування безекіпажними надводними суднами як носіями групи автономних ненаселених підводних апаратів.

Наведені у монографії розв'язки поставлених задач утворюють теоретичне підґрунтя для інженерів-розробників систем автоматичного керування автономними ненаселеними підводними апаратами та безекіпажними надводними суднами як носіями такого виду засобів морської робототехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блинцов В.С., Ястребов В.С., Гарбуз Е.И., Филатов А.М., Иванишин Б.П., Трунов А.Н., Павлов А.П. Разработка и испытания адаптивного подводного робота // Подводно-технические средства исследования океана: сб. научн. трудов / М., Академия наук СССР, Институт океанологии им. П.П. Ширшова, 1990. – С. 98-112.
2. Amy Nevala, Lonny Lippsett. Nereus Soars to the Ocean's Deepest Trench New hybrid deep-sea vehicle descends 6.8 miles in the Challenger Deep. WHOI <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/nereus-soars-to-the-oceans-deepest-trench/>
3. Antonelli G. (2014). Underwater Robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 279 p.
4. Gwyn Griffiths. Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles. CRC Press, 2002. – 368 Pages.
5. Templeton J.S. Offshore Technology in Civil Engineering: Hall of Fame Papers from the Early Years. – American Society of Civil Engineers, 2006. – 160 pages.
6. Ballard, Robert D. New Archaeological Oceanography. – Princeton University Press, 2008. – 287 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. Книрік, 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+Multi+Agent+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 управления "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). Pp.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 наук. с. 8-13. <https://cyberleninka.ru/article/n/smeshannyye-strategii-grupпового-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. 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. <http://znp.nuos.mk.ua/archives/2016/3/15.pdf>

43. Голембо В.А., Бочкарьов 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/primenenie-multiagentnyh-tehnologiy-dlya-upravleniya-gruppo-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-2019.00033
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 "УВІК "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>

- 1 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: 10.5772/923
- Вычислительная 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. 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>
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. Системы автоматического управления движением судна : 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Феникс, 2007. 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
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. (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_korrektnosti_vychisleniya_starshih_proizvodnyh_tsifrovom_regulyatore](https://studme.org/101803/informatika/obespechenie_korrektности_vychisleniya_starshih_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
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
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
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 операціях. *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%2Fexpls%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://www.smp-ltd.com/our-solutions/launch-and-recovery-systems/?gclid=EAIaIQobChMIv8i3sd3U9gIVDK-yCh1HVgxDEAAYASAAEgIZY_D_BwE

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, Toshihiro Maki, 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 системи автоматического управления групповым движением АНПА. *Підводна техніка і технологія: матеріали IX 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 інтелектуальної системи 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 IX 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. Joel Coito. Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities and Challenges in Ocean Law and Policy. Published by the Stockton Center for International Law. Volume 97, 2021. 49 Pages. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>

133. The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. Benedict’s Maritime Bulletin December

2017. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>

134. Zhixiang Liua, Youmin Zhanga, Xiang Yua, Chi Yuana. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, Volume 41, 2016, Pages 71-93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>

135. Unmanned and Autonomous Ships. An Overview of MASS. By R. Glenn Wright. Published March 24, 2020 by Routledge. 288 Pages.

136. N. Tesla. Method of and apparatus for controlling the mechanism of moving vessels or vehicles. Patent USA №613,809. Patented Nov. 8, 1898. <https://russian.rt.com/article/317543-nikola-tesla-zapatentoval-ispolzovanie-voennyh-besplotnikov-v>

137. В. Щербаков. Война на море — эпоха машин. <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6260/>

138. Телеуправляемые красноармейцы: катера волнового управления. <http://alternathistory.com/teleupravlyaemye-krasnoarmejsy-katera-volnovogo-upravleniya/>

139. Боргезе В. Десятая флотилия МАС. Перевод с итальянского С.В. Славина и Ю.А. Карулина. М. : Изд-во иностранной литературы, 1957. 281 с.

140. U.S. Department of the Navy, The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan, July 23, 2007. [Электронный ресурс] Дата обращения 27.08.2014. – URL : <https://www.hsdl.org/?view&did=479083>

141. One platform, one complete view of Defence market data. https://plus.shephardmedia.com/login/?next=https%3A%2F%2Fplus.shephardmedia.com%2Fdetail%2Fprotector-1%2F%3F_ga%3D2.181422951.1561353826.1634494976-2061357576.1634494975

142. Protector. Unmanned Surface Vehicle RAFAEL. <https://web.archive.org/web/20070503115143/http://www.defense-update.com/products/p/protector.htm>

143. Research in maritime autonomous systems. Project results and technology potentials. <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>

144. Justin E. Manley. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development. Battelle Applied Coastal and Environmental Services. (2008). Conference: OCEANS 2008. DOI:10.1109/OCEANS.2008.5152052. <https://www.ieeeoes.org/history/080515-175.pdf>

145. Vitor A. M. Jorge, Roger Granada, Renan G. Maidana, Guilherme Heck, Alvaro P. F. Negreiros, Davi H. dos Santos, and Alexandre M. Amory. A Survey on Unmanned Surface Vehicles for Disaster Robotics: Main Challenges and Directions. *Sensors* 2019, 19(3), 702; doi.org/10.3390/s19030702

146. Nuno Mathias. Autonomous surface vehicles and the new directions of maritime exploration. *INEGI driving & Innovation*. 01 July 2020. <http://www.inegi.pt/en/news/autonomous-surface-vehicles-and-the-new-directions-of-maritime-exploration/>

147. Rolls Royce : AAWA project introduces the project's first commercial ship operators. <https://www.marketscreener.com/quote/stock/ROLLS-ROYCE-HOLDINGS-PLC-4004084/news/Rolls-Royce-AAWA-project-introduces-the-project-s-first-commercial-ship-operators-22156271/>

148. Autosea – Sensor fusion and collision avoidance for autonomous surface vehicles. <https://www.ntnu.edu/autosea>

149. Falco (беспилотный паром). https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Falco_%28%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BC%29

150. Berge, Svein P., Hagaseth, Marianne, Kvam, Per Erik, Rinnan, Arne. Hull-to-Hull Concept Supporting Autonomous Navigation. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2598992>

151. Autonomous Vessels are Becoming a Commercial Reality. <https://www.maritime-executive.com/editorials/autonomous-vessels-are-becoming-a-commercial-reality>

152. Unmanned 12-Meter Ship Aims to Be First to Cross Atlantic Without Crew. <https://gcaptain.com/unmanned-12-meter-ship-to-cross-atlantic/>

153. Автономные морские системы на страже интересов Китая. <https://army-news.org/2018/12/avtonomnye-morskie-sistemy-na-strazhe-interesov-kitaya/>

154. Cable Inspections the Uncrewed Way. <https://www.hydro-international.com/content/article/cable-inspections-the-uncrewed-way>

155. Autonomous Surface Vessel USV Unmanned Ski Boat ORCA UBOAT For Water Surfing. <https://mart.ecer.com/orcauboot/pz65bfc1b-autonomous-surface-vessel-usv-unmanned-ski-boat-orca-uboot-for-water-surfing.html>

156. Elbit Systems UK uses Seagull USV during Anti-Submarine Warfare trials with UK MoD. <https://www.auvsi.org/industry-news/elbit-systems-uk-uses-seagull-usv-during-anti-submarine-warfare-trials-uk-mod>

157. Water Pollution Monitoring RC Boat River Cleaning Robot For Urban Inland Rivers 430kg. <https://mart.ecer.com/orcauboot/pz65bfc8d-water-pollution-monitoring-rc-boat-river-cleaning-robot-for-urban-inland-rivers-430kg.html>

158. Cable Route Survey with Unmanned Survey Vehicles. <https://geo-matching.com/content/cable-route-survey-with-unmanned-survey-vehicles>

159. What Is a Saildrone? <https://www.saildrone.com/technology/vehicles>

160. Caccia, M.; Bibuli, M.; Bono, R.; Bruzzone, Ga.; Bruzzone, Gi.; Spirandelli, E. Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. Marine Technology Society Journal, Volume 41, Number 2, Summer 2007, pp. 62-71(10). DOI: <https://doi.org/10.4031/002533207787442259>

161. Koji Wariishi. Maritime Autonomous Surface Ships : Development Trends and Prospects – how Digitalization Drives Changes in Maritime Industry. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report/ September, 2019. 8 Pages.

https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/___icsFiles/afieldfile/2020/01/09/1909t_wariishi_e.pdf

162. Blintsov V.S., Klochkov O.P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43-51.

163. Kris Osborn. The Navy's Unmanned Surface Vessels Will Be Hungry for Energy. <https://nationalinterest.org/blog/buzz/integrated-power-and-energy-systems-will-power-21st-century-weapons-199462>

164. Wang Guo, Song Wang, Wenqiang Dun. The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2015, 7, 150-156 <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOAUTOCJ/TOAUTOCJ-7-150.pdf>

165. Paweł Burdziakowski, Andrzej Stateczny. (2019) Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, 26(101). 30-39 pages. DOI:10.2478/pomr-2019-0004

166. Hyunjoon Cho, Sang-Ki Jeong, Dae-Hyeong Ji, Tran Ngoc Huy. (2020). Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Journals Sensors Volume*, 20. Issue 9. 22 pages. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2633>

167. Блинцов В.С., Фан Ван Ван. Задачи совершенствования информационно-управляющих систем для малоразмерных скоростных судов // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. № 7(385). С. 140-146.

168. Дакі О.А., Олізаренко С.А., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я., Тришин В.В. Інформаційна технологія розробки бази знань інтелектуальної системи автоматичного управління рухом судна. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 3(67). С. 52-60. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.07>.

169. Unmanned Sailing Vehicle Tested for Data-Gathering Capabilities. <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21121743/igus-inc-unmanned-sailing-vehicle-tested-for-datagathering-capabilities>

170. Блінцов В.С., Соколов В.В. Сучасні задачі автоматизації керування безекіпажним надводним катером. *Автоматика-2016 : матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління*. 2016. С. 201-202.

171. Сабуцький І.П. Інтелектуальна система автоматичного керування малорозмірним безекіпажним судном в умовах дії зовнішніх збурень. *Підводна техніка і технологія: Матеріали XI всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю*. Миколаїв : НУК, 2021. С. 220-225.

172. Жуков Ю. Д. Мореходные качества корабля. Николаев: Издательство Наваль, 2007. 144 с.

173. Jialu Du, Xin Hu, Yuqing Sun. Adaptive Robust Nonlinear Control Design for Course Tracking of Ships Subject to External Disturbances and Input Saturation. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS*. DOI:10.1109/TSMC.2017.2761805

174. e-Navigation. <https://en.wikipedia.org/wiki/E-Navigation>

175. Tristan Perez. Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins. Springer-Verlag London Limited, 2005. 300 pages. DOI:10.1007/1-84628-157-1
176. Блинцов В.С., Фан Ван Ван. Задачи совершенствования информационно-управляющих систем для малоразмерных скоростных судов // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. № 7(385). С. 140-146.
177. Блинцов С.В., Фан Ван Ван. Особенности применения нечетких регуляторов в режиме стабилизации судна на курсе // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 8(386). – С. 133-140.
178. Integrated Bridge System. Navigating the Future Today. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/integrated-bridge-system>
179. Nadtochii, V., & Nadtochy, A. (2019). Methods for ensuring the navigation safety of unmanned surface vessel. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(2(50), 19–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.187286>
180. 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.
181. 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
182. Катер на p/y Sea Ray New Bright (6785). http://rozetka.com.ua/new_bright_35042/p664719/

Додаток А. Основні залежності між системами координат та кінематичні параметри АНПА

А1. 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. А1).

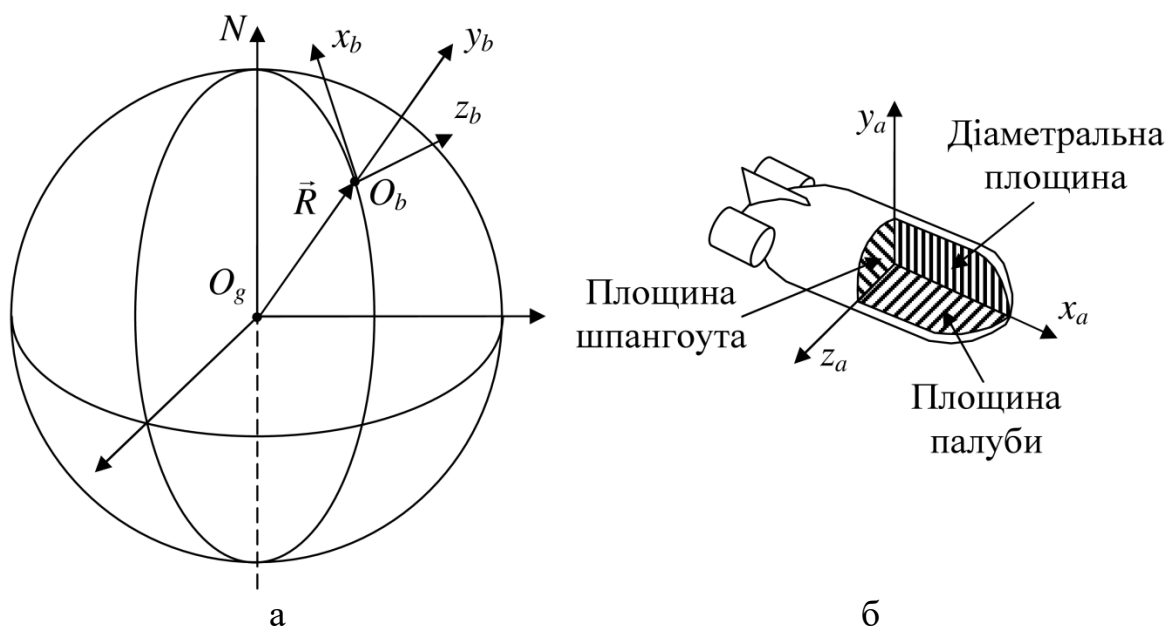


Рис. А1 – Системи координат:
а – земна базова; б – зв'язана з АНПА

А1.1. 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. А1, 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.

А1.2. Зв'язана система координат

Рухомою координатною системою $O_a x_a y_a z_a$, повністю зв'язана з корпусом АНПА, переміщується й обертається разом з ним (рис. А1, б). Її центр

сполучено з центром мас АНПА, а осі збігаються з головними центральними осями інерції АНПА. Поздовжня вісь O_ax_a і нормальна вісь O_ay_a лежать у поздовжній площині симетрії АНПА (діаметральній площині). Перша з них спрямована до носової частини, друга – вертикально вгору. Поперечна вісь O_az_a утворює з ними праву прямокутну координатну систему і разом з поздовжньою віссю O_ax_a розташовується в горизонтальній площині (площини палуби), а разом з вертикальною віссю O_ay_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.

А1.3. Базиси систем координат

Якщо в деякому тривимірному векторному просторі $\mathbb{R}^3$ задано деякий вектор $\vec{h}$, то чисельні значення його координат залежатимуть від того, в проєкціях 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 $\mathbb{R}^3$.

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 $\mathbb{R}^3$.

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.

А1.4. 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 $O_a x_a y_a$ і вертикальною площиною, яка містить вісь БСК $O_b y_b$ та поздовжню вісь ЗСК $O_a x_a$;

- кут рискання ϕ – кут між проєкцією осі ЗСК $O_a x_a$ на горизонтальну площину БСК $O_b x_b z_b$ та віссю $O_b x_b$;

- кут диференту ψ – кут між віссю ЗСК $O_a x_a$ і горизонтальною площиною БСК $O_b x_b z_b$.

Слід зазначити, що елементи вектор-рядка $\bar{q}$ задаються кутами, а не проекціями на осі БСК, тому індекс належності до базису B для чисельних значень кутів θ, φ, ψ не застосовується.

А1.5. 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.

А1.6. 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 А, заданих в базисі В, 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 А та В виконується на основі рівнянь.

А1.7. 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	4
1 СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ	5
1.1 Загальна характеристика автономних ненаселених підводних апаратів, призначених для групового використання	5
1.2 Сучасні методи групового застосування АНПА	8
1.3 Способи організації керування групою пошукових АНПА	14
1.4 Аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА	18
1.5 Актуальні задачі автоматизації пошукових підводних операцій	23
2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ	26
2.1 Попередні зауваження	26
2.2. Основні складові математичної моделі одиночного АНПА групи	27
2.3 Математичне моделювання динаміки одиночного АНПА як об'єкта керування	28
2.4 Математичне моделювання керованого руху одиночного АНПА як «агента» групи	36
2.5 Короткий огляд методів експериментального дослідження систем автоматичного керування АНПА	52
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОВИМ РУХОМ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ПОШУКОВОГО ТИПУ	54
3.1 Сучасні групові пошукові підводні місії АНПА та особливості автоматизації їх виконання	54
3.2 Автоматизація керування морським безекіпажним комплексом із групою пошукових АНПА	61
3.3. Синтез системи автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи	67
4 ДЕЯКІ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ ЯК НОСІЄМ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ	87
4.1 Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв АНПА	87
4.2. Формулювання головних задач створення БНС на основі системного підходу	92
4.3 Особливості БНС як об'єкту автоматичного керування	94

4.4 Система автоматичного керування курсом БНС	100
4.5 Вдосконалення системи керування рухом БНС при стабілізації на траєкторії	103
4.6 Методи забезпечення безпеки плавання БНС	105
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЯК «АГЕНТОМ» ГРУПИ	110
5.1 Короткий опис організації морського натурального експерименту	110
5.2 Аналіз результатів морських натурних випробувань САК АНПА	118
ВИСНОВКИ	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	124
Додаток А. Основні залежності між системами координат та кінематичні параметри АНПА	139

Наукове видання

**ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ГРУПОЮ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ
ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ**

Монографія

*За редакцією
доктора технічних наук, професора В. С. Блінцова*

Формат 60×84¹/₁₆. Ум. друк. арк. 8,5. Тираж 300 пр. Зам. № 534-681.

ВИДАВЕЦЬ І ВИГОТОВЛЮВАЧ

Товариство з обмеженою відповідальністю фірма «Іліон».

54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1506 від 25.09.2003 р.