

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ НЕНАСЕЛЕНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ

CHAPTER 1. MODERN TASKS OF GROUP CONTROL OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

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

1.1. General characteristics of autonomous underwater vehicles designed for group application

Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) 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 водного середовища, геологорозвідка, морська газо- і нафтовидобувна промисловість, військово-морські 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 англійській 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 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.

Autonomous underwater vehicles (AUVs) refer to a highly efficient type of marine robotics and are widely used to perform search and survey operations in the entire depth range of the World Ocean [1-3]. The main areas of their applications are oceanography, environmental protection, geological exploration, offshore oil and gas production industry, mine action, etc. [4-6].

The increase in the volume of underwater operations and the AUVs technical characteristics continuous improvement stimulate in a new application direction – simultaneous group application in large water areas (Multi-agent systems, MAS). This ensures the greatest efficiency of underwater operations – the maximum performance of search operations and the maximum reliability of the data obtained about the underwater environment through parallel, in time, and its parameter measurements [7; 8].

For such operations, special types of AUVs, which are designed to carry out search, research and other underwater operations within the group technology implementation framework, when the collection of data on the marine environment or underwater search is carried out simultaneously by several AUVs under a joint program, are being created today [9-12].

Examples of small-sized AUVs designed to perform underwater search operations in the group application mode are shown in Fig. 1.1. Let us briefly examine the design.

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

Проект “The Jeff Platform” являє собою мікро-АНПА, який спеціально спроектовано для групового застосування з метою проведення масштабних екологічних досліджень водного середовища [13]. На рис. 1.1 *a* 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 Platform” [9].

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

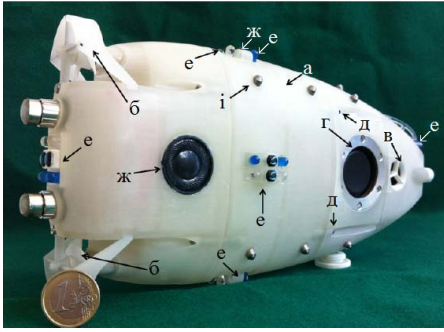
features of a typical AUV, which reflects the group application specifics.

The Jeff Platform project is a micro-AUV, which is specially designed for group use (application) in order to carry out large-scale ecological studies of the aquatic environment [13]. In Fig. 1.1 *a* shows the main structural elements of the AUV: a – outer hull (hydrodynamic fairing); b – stern engines (propellers); c – lagged engine (propeller); g – buoyancy system; e – connectors for environmental sensors; e – optical communication system; g – hydrophone; h – loudspeaker of the acoustic communication system; and – electrodes for potential field communication (numbered one).

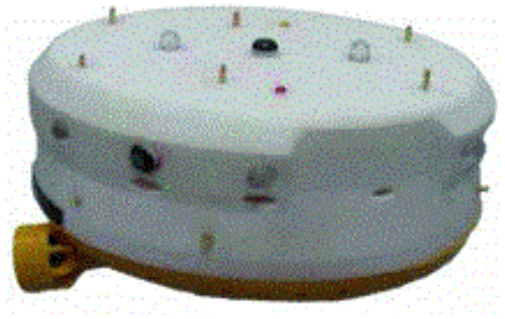
Thus, each AUV, as an «agent» of the group, is equipped with three systems for information exchange with other underwater vehicles, which makes it an effective group element with a reliable system and communications.

Similar in principle of operation is another product of the European project EU-FP7 – «The Lily AUV Platform» [9].

Promising for Ukraine is the construction and use of the «Scanner» project of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, which is being developed in the interests of the State Emergency Service of Ukraine, in AUV search underwater missions [14]. Such an AUV, as search instrumentation, has a photo and video system, as well as hydroacoustic search devices for underwater objects. AUV of the «Scanner» project has one screw propeller (SP) of counter-rotary rotation and a tail unit in the form of a vertical rudder (for controlled tail in the horizontal plane) and a horizontal rudder (to change the motion depth). Communication with other AUVs of the group is provided by hydroacoustic communication devices. It is the AUV of this project that is considered in the work as the control object.



a (a)



б(b)



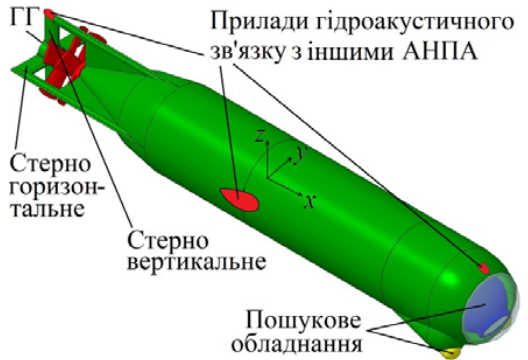
в(c)



г(d)



д(e)



е(f)

Рисунок 1.1 – Сучасні малогабаритні АНПА, призначені для виконання підводних робіт у режимі групового застосування: *a* – “The Jeff Platform” (ICT, EU-FP7); *б* – “The Lily Platform” (ICT, EU-FP7); *в* – “EcoSUB μ & EcoSUBm (“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)

Figure 1.1 – Modern small-sized AUVs designed to perform search underwater operations in group application mode: *a* – “The Jeff Platform” (ICT, EU-FP7) *b* – “The Lily Platform” (ICT, EU-FP7) *c* – “EcoSUB μ & EcoSUBm (“Planet Ocean Ltd”, University of Southampton, UK) *d* – “VERTEX” (“Hydromea”, USA) *e* – “AUV-M” (SPSMTU, Russia), *f* – “Scanner” (Admiral Makarov National University of Shipbuilding project)

Одним з головних питань по організації групового застосування АНПА є оперативне керування деякою множиною (групою) апаратів з метою їхнього погодженого руху у водному середовищі для досягнення загальної мети (в англійській літературі – виконання підводної місії, Underwater Mission, UM).

Вивчення вітчизняної та зарубіжної літератури свідчить, що групове застосування АНПА знаходиться на початковій стадії свого розвитку [15; 16]. Причому, розробляються як апаратні засоби АНПА, так і їх системи автоматичного керування (САК) такими об'єктами [17; 18]. У світовій практиці цей прикладний напрямок робототехніки отримав назву «Collective Cognitive Robots» (CoCoRo, колективні когнітивні апарати-роботи) [19; 20]. Причому, ключові розробки у цьому напрямку проводяться як міжнародні проекти у вигляді європейських грантів та міжуніверситетських програм [21].

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

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

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

- поведінку групи АНПА важко передбачити у реальних умовах експлуатації, оскільки вона формується у результаті локальної взаємодії багатьох «агентів» групи – окремих АНПА;
- існуючі на сьогодні засоби підводного зв'язку поки не у повній мірі відповідають вимогам до систем інформаційного обміну між окремими АНПА групи;

One of the main issues in the AUV group application organization is the operational control of a set (group) of vehicles for the purpose of their coordinated movement (motion) in the aquatic environment to achieve a common goal (implementation of Underwater Mission, UM).

The study of domestic and foreign literature shows that the AUV group application is at the initial stage of its development [15; 16]. Moreover, both AUV hardware and their automatic control systems (ACS) of such objects are being developed [17; 18]. In the global practice, this applied direction of robotics is called “Collective Cognitive Robots” (CoCoRo) [19; 20]. Moreover, the key developments in this direction are carried out as international projects in form of European grants and inter-university programs [21].

This approach is based on the application of the principles of joint actions observed in wildlife (the movement of flocks of birds, schools of fish, etc.) and received the abbreviation SWARM (Small World Autonomous Robots for Micro-manipulation).

For global science, as noted in [22], this direction is relatively new. However, its prospect is determined by the advantages of group execution of underwater search and survey operations in comparison with operations that are performed by single AUVs with centralized control.

However, researchers point to objective difficulties standing in the way of industrial use of AUV groups in marine and naval research. These difficulties primarily include the following:

- it is difficult to foresee the behavior of the AUV group in real operating conditions, since it is formed as a result of the local interaction of many group «agents» – individual AUVs;
- the existing underwater communication facilities do not fully meet the requirements for information exchange systems between individual AUVs of the group;

– 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.

– experimental verification of the AUV group performance for too complex practical tasks, since its organization in real production conditions is risky due to the possible loss of individual AUVs;

– the lack of reliable technology computer simulation of AUV group application processes, resulting in its results inaccuracy when studying group control algorithms of such underwater vehicles.

However, there is information about the group applications in modern foreign literature, but, this information is advertising and informational in nature and does not give a complete idea of the solution to the scientific task of motion control (organization) and operational control for the AUV group.

1.2. Сучасні методи групового застосування АНПА

1.2. Modern methods of AUV group application

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 затонуваних 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

As the global experience shows [23-25], the main underwater technologies for the AUVs group use, first of all, include the following:

– search operations – search for sunken objects and underwater anomalies caused by natural processes and anthropogenic impacts on the aquatic environment;

– scientific research – studying the hydrophysical and hydrochemical properties of the aquatic environment;

– environmental research – the study of the ecological status of the aquatic environment and its changes over time (water pollution processes, the consequences of global warming on the planet, etc.);

– research and inspection operations – a detailed study of the state of underwater objects and their documentation;

– military operations – information support of the State Navy activities.

It should be noted that underwater search operations are the most common in underwater missions, since they are an integral part (component) of most scientific, environmental and other missions.

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).

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 гребними гвинтами, мають відповідні системи автоматичного забезпечення заданої плавучості.

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

In summary, these methods are shown in Fig. 1.2.

It should be noted that the specified methods have significantly different requirements both for the number of AUVs in the group and for their functional organization, and for the individual technical characteristics of the individual AUVs.

Therefore, conceptually, in the development of AUVs group use methods (CoCoRo – technologies), the development of two directions of automation is observed [21; 22]:

- development of AUV individual characteristics as a group «agent» C_{Ag} ;
- development of AUV group application control methods C_{Gr} .

Both areas are currently characterized by three main automation development levels:

- basic level B of an individual AUV automation;
- local level L of AUV group control;
- global level G of automation of underwater missions (for example, search operations).

The main indicators of the development of individual and group characteristics of AUVs, as control objects, are shown in Fig. 1.3.

Let’s consider them in more detail.

The first automation direction C_{Ag} at the automation basic level B is based on innovative technical solutions B_{Ag} to improve the AUV hardware as an automation object. It provides for the use of special technologies for the construction of AUVs, driven by software-controlled propellers, have appropriate systems for automatically ensuring given buoyancy.

Usually, such AUVs are also equipped with developed self-diagnostics and recovery systems, which significantly increase their reliability as group “agents”.

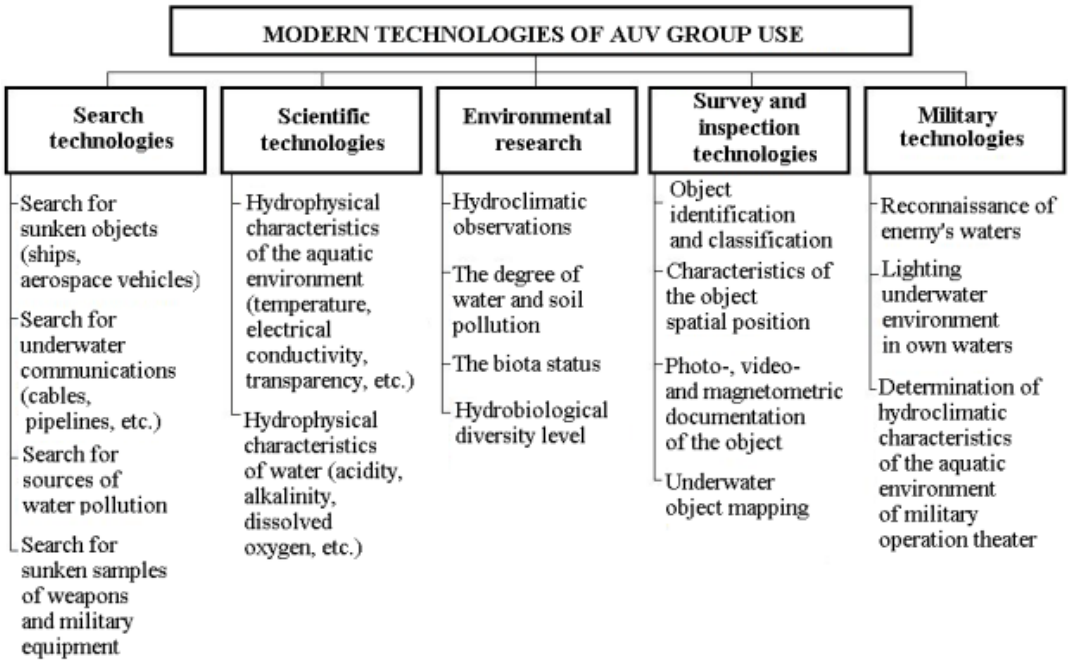
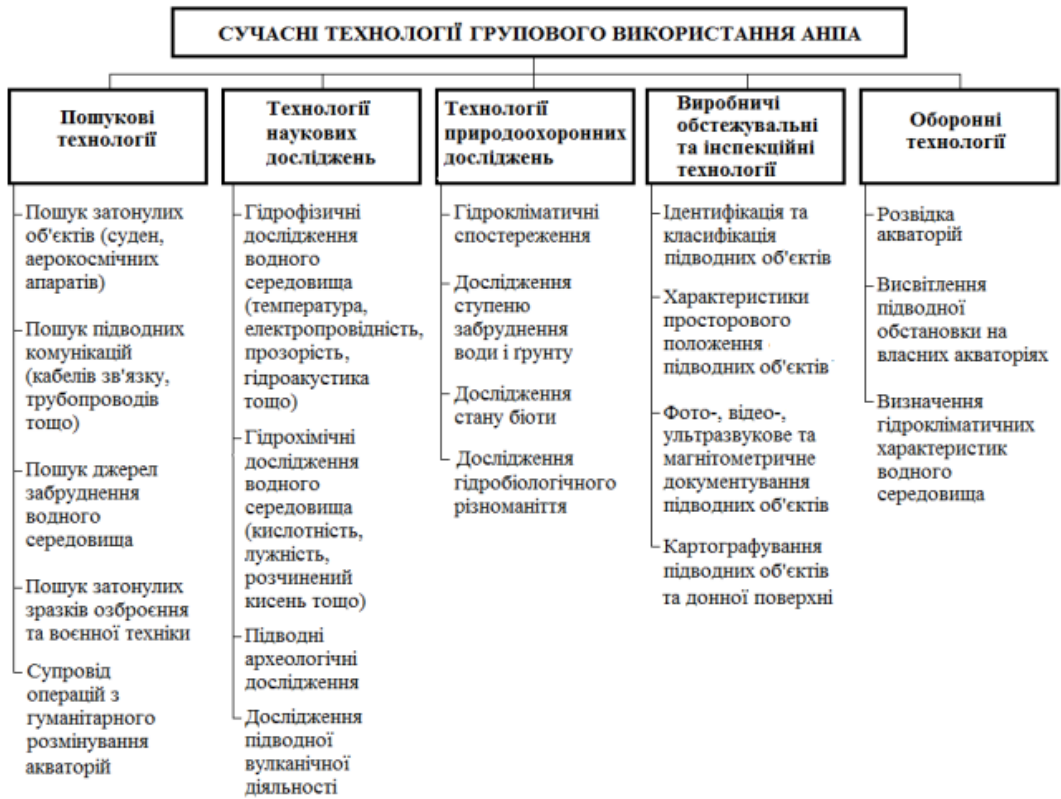
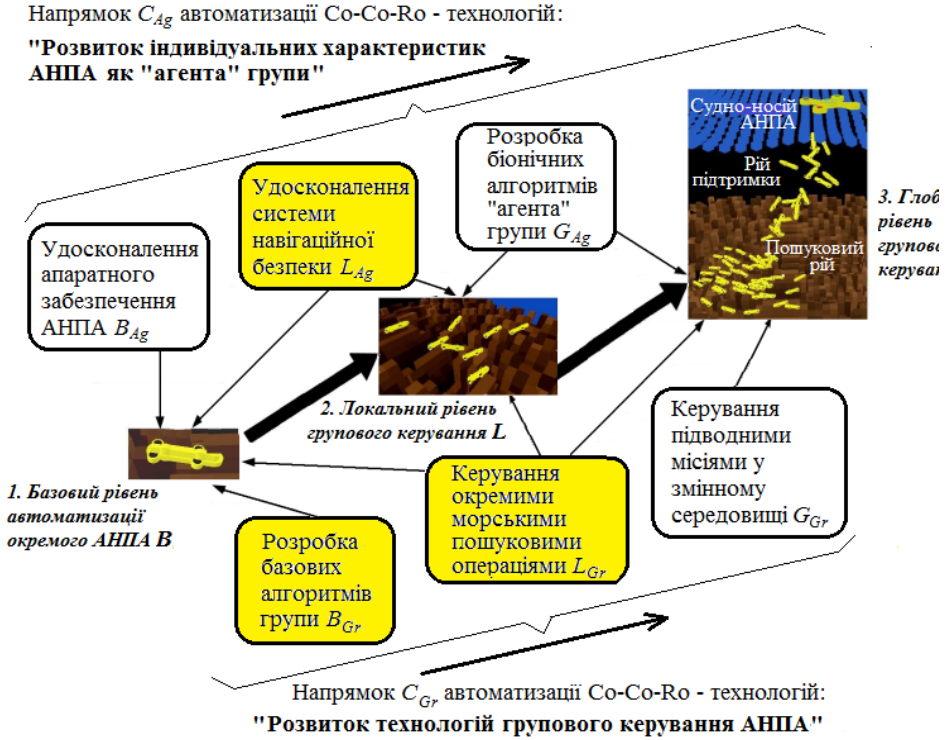


Рисунок 1.2 – Основні методи групового використання АНПА

Figure 1.2 – Basic technologies of AUV group application



Automation direction C_{Ag} of Co-Co-Ro - technologies:
 "Development of AUV individual characteristics as a group "agent ""

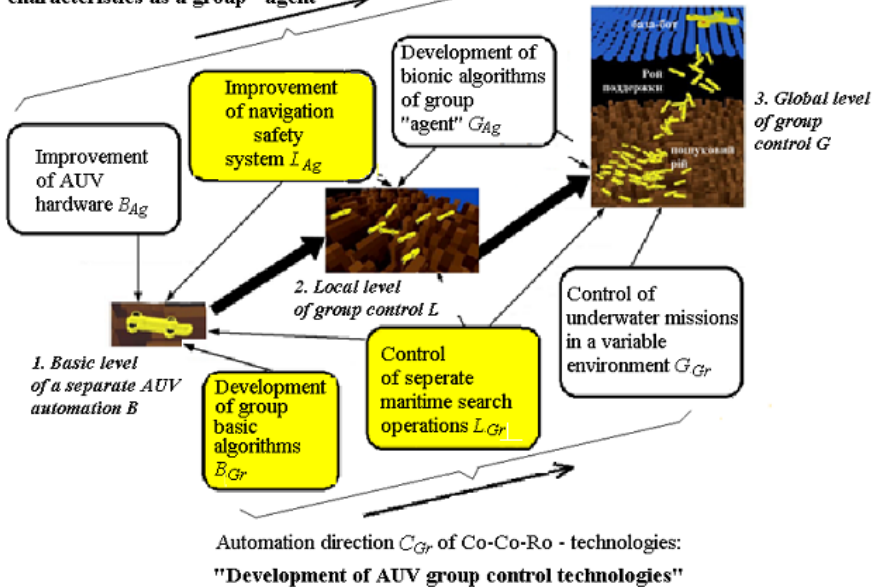


Рисунок 1.3 – Основні рівні розвитку індивідуальних та групових характеристик АНПА як об'єктів керування
 Figure 1.3 – The basic development levels of individual and group characteristics of the AUV as control objects

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

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

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

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

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

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

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

At the automation local level L , the automation direction C_{Ag} contains measures to ensure the AUV spatial motion navigational safety as part of the group L_{Ag} . For orientation under water, trouble-free movement and recognition of search objects, such devices have a developed sensor system – optical, hydroacoustic, magnetometric, and the like.

An important component of the first direction of the AUV development C_{Ag} at the global level G of underwater search technologies automation is the development of software, which includes the development of basic algorithms for their behavior as part of a group and the development of algorithms for organizing group movement behind the bionic analogs of C_{Ag} (for example, the behavior of a flock of birds or fish).

Thus, for the first direction of the AUV development C_A , which ensures the development of the AUV individual technical characteristics as the main executive tool of the search underwater technology (group «agent»), the following set of automation tasks can be highlighted:

Analysis of the current status of domestic underwater robotics development [26] shows that theoretically, the most relevance task is the L_{Ag} automation task, since its successful solution should increase the safety of the AUV spatial motion in the group. Therefore, later in the work, the problem of L_{Ag} automation is solved (highlighted with color in Fig. 1.3).

The second automation direction C_{Gr} of the technology development for the AUV group application – the development of control technologies of their group application – provides (involves) the following typical research works:

- development of AUV operation basic algorithms in the group B_{Gr} (for example, control of a group search for an underwater object or of an AUV group coordinated motion when performing an environmental survey of the aquatic environment in order to identify anthropogenic pollution);

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

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

Тоді для другого напрямку CG 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} та L_{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} та L_{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) – кожен «агент» розв'язує свою індивідуальну задачу місії (наприклад, гідроакустичний пошук чи відеозйомка донної поверхні по маршруту руху; кожен окремий «агент» має навігаційні засоби для безпечного руху у складі рою, проте, не має інформації про загальне завдання місії, про склад рою та про положення і ролі інших «агентів»;

– development of basic algorithms of control of certain types of maritime search operations L_{Gr} , which included the entire list of maritime operation phases, starting from organizing the release of a group of AUVs into the sea and ending with their return after the completion of the search mission;

– development of AUV group control methods under the changing environmental conditions G_{Gr} (effects of external disturbances of natural or anthropogenic origin).

Then, for the second direction CG using Co-Co-Ro technologies, the set of basic automation tasks can be represented as:

For the modern (current) stage of domestic underwater robotics development, the tasks B_{Ag} and L_{Ag} should be attributed to the primary tasks of AUV group control automation, since they are at the initial stages of development of technologies for control of AUV group application G_{Gr} (highlighted in Fig. 1.3).

In this regard, in further researches in the direction of C_{Gr} , tasks B_{Ag} and L_{Ag} are considered.

Note also that the CoCoRo-technologies development concept described above allows classifying the AUV group application according to the amount of information that the group AUVs possess and can be exchanged [27]. So, at present, the following three methods of AUV group application are distinguished according to the amount of information for each «agent»:

– swarm (by analogy with insect populations) – each «agent» solves its own individual mission task (for example, hydroacoustic search or bottom surface video recording along the motion route; each individual «agent» has nav aids (navigational aids) for safe motion in the swarm, however, does not have information about the general mission task, the composition of the swarm and the positions and roles of other «agents»;

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

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

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

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

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

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

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

– автоматичне керування окремим АНПА $A_{АНПА-M}$ як «агентом» групи, який авто-

– flock (by analogy with flocks of birds and schools of fish) – each individual «agent» has minimum information link with other AUVs necessary to complete the mission (for example, to adjust the current operation of an underwater mission) simultaneously, each individual «agent» has navaid for safe motion in the flock, although it may not have information about its general composition and characteristics; the motion of an individual «agent» is subject to the motion of its AUV-leader;

– collective (by analogy with collectives of people) – each individual «agent» performs an individual task that can be changed during the mission; a separate «agent» has the ability to exchange information with other AUVs as members of the group, has information about the purpose of the underwater mission and its individual components, as well as about the characteristics of the AUV – team members.

Methods for implementing technologies of AUV group application according to the levels of their information awareness and the intensity of information exchange between AUVs as automation objects are shown in Fig. 1.4.

A preliminary analysis of publications makes it possible to establish that the applied scientific problem P_{Gr} of AUV group application process automation is expedient to represent in form of four relatively independent tasks:

– formulation of the goal (end product) of the underwater mission P_{Gr-M} which is necessary to be performed by the AUV group in an automatic mode by simultaneously performing a number of underwater operations;

– program development for the underwater mission P_{Gr-P} automatic execution by the AUV group (control strategy), when each AUV, as an “agent” of the group, performs its part of the general operation;

– automatic control of parallel processes of the developed program of automatic execution of underwater mission A_{Gr-M} by the AUV group;

– automatic control of an individual AUV A_{AUV-M} as a group «agent», which automatically

матично виконує визначену йому частину розробленої програми підводної місії.

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

performs an assigned part of the underwater mission developed program.

The scientific problem tasks P_{Gr} can be represented in a set form:

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

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

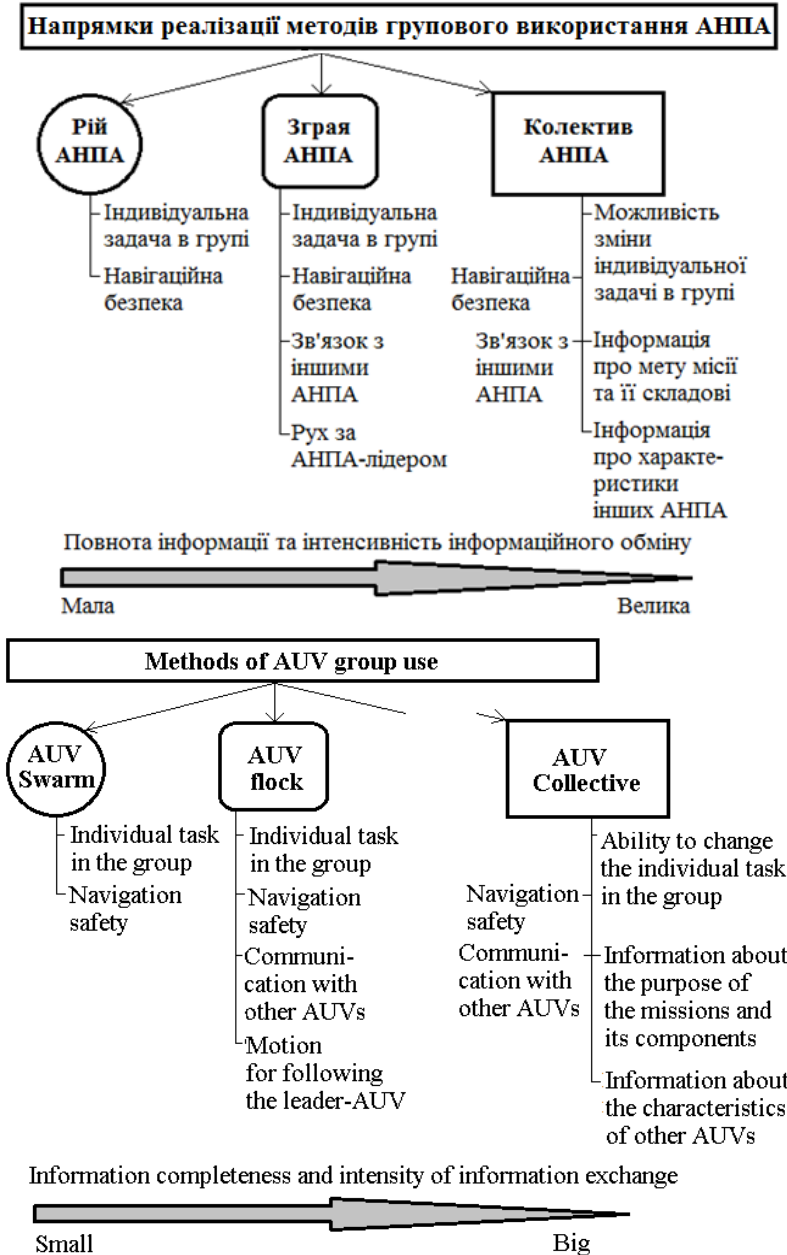


Рисунок 1.4 – Напрямки реалізації методів групового використання АНПА

Figure 1.4 – Methods of implementing technologies of AUV group use

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

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

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

Наприклад, для пошукових місій це можуть бути географічні координати донної акваторії, яку треба обстежити для пошуку затонулого об'єкта з заданими класифікаційними ознаками. Для реалізації підводних наукових досліджень це можуть бути просторові координати водної товщі, яку необхідно відсканувати бортовими сенсорами АНПА гідрофізичних та/чи гідрохімічних параметрів води.

Розв'язок задачі P_{Gr-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 $A_{АНПА-M}$ автоматичного керування окремими АНПА як «агентами» групи має одночасно забезпечувати:

The proposed decomposition of control problems (1.3) obviously will determine the hierarchical structure of the control system of the underwater mission as a whole.

The first two tasks, as a rule, provide for the development of a detailed algorithm (sequence of underwater operations) for the AUV group functioning and are performed without taking into account the dynamics of the AUV.

So, the solution of the task P_{Gr-M} is to formulate implementation quantitative indicators of one or several technologies shown in Fig. 1.2.

For example, for search technologies, this may be the geographical coordinates of the bottom water area, which must be surveyed to search for a sunken object with predetermined classification characteristics. For the implementation of research technologies, these can be the spatial coordinates of the water column, which must be scanned by the AUV onboard sensors of hydrophysical and/or hydrochemical water parameters.

The solution of the task P_{Gr-P} consists of the development of trajectories of a plane or spatial time-coordinated movement for each of the group AUVs. Such movements must comply with the given underwater technology (Fig. 1.2) and guarantee the achievement of the mission goal under the conditions of technical limitations of individual types of AUVs in terms of autonomy and range of communication facilities between them.

The task A_{Gr-M} of automatic control of execution parallel processes of the underwater mission developed program to develop control laws for individual AUVs as group “agents”, which have to move in the water space in accordance with the program P_{Gr-P} . Here, an important component of the control task is to ensure the spatial configuration of the AUV group given by the program P_{Gr-P} , which should guarantee high-quality and timely implementation of the underwater mission.

The task A_{AUV-M} of automatic control of individual AUVs as group «agents» must simultaneously provide:

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

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

– plane or spatial motion control of these AUVs according to the program under the influence of external disturbances and taking into account the resources of individual group AUVs (maneuvering qualities, the range of their communication facilities, etc.); the key requirement here is the sub-task of «preserving» the group throughout the entire mission, that is, preventing the removal of neighboring AUVs to such an extent, exceeding the range of communication facilities; also an important requirement is to prevent a dangerous approach (proximity) of neighboring AUVs due to their possible collision;

– AUV payload control (as a rule, these are onboard sensors – of hydrophysical and hydrochemical water parameter sensors, search cameras and hydroacoustic sonar, etc.); the essence of control is to ensure its functioning in accordance with the program of the underwater mission execution P_{Gr-P} .

1.3. Способи організації керування групою пошукових АНПА

1.3. Control organization methods of a group of search AUVs

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

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

Group AUVs must organize themselves to perform specific tasks in complex operations. In the process, the architecture of the AUVs, the task allocation between them, the control strategy P_{Gr-P} , the localization of control tasks A_{Gr-M} the organization of their group coordinated motion A_{AUV-M} should be taken into account. The effectiveness of AUV group application depends on the selected control method. As a result of the analysis of typical underwater operations and methods (technologies) of their solution using the AUV group [31], the authors proposes the AUV group control methods classification [32; 33].

Depending on the multi-agent system organization, the AUV group control methods are divided into two main controls – centralized and decentralized control (Fig. 1.5).

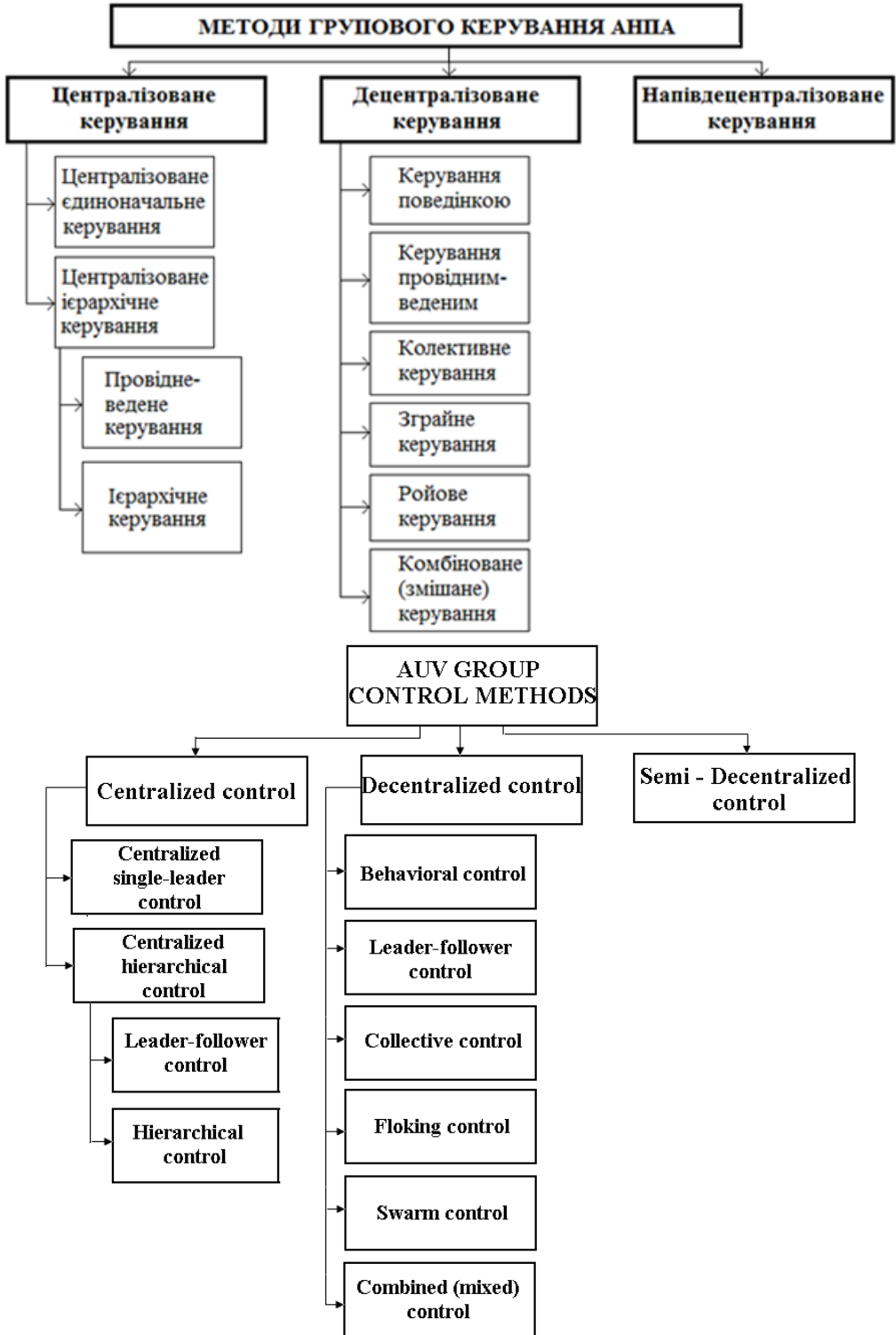


Рисунок 1.5 – Способи організації керування групою АНПА

Figure 1.5 – Methods AUV group control organization

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

При централізованому єдиноначальному керуванні є ведучий АНПА і множина ведених апаратів у групі. Всі АНПА синхронізуються ведучим, всі АНПА використовують той самий центральний контролер, що функціонує на основі інформації про всіх АНПА групи. Склад контролерів групи кодує логіку керування групою. Ведучий АНПА забезпечує оптимальне рішення спільного завдання, однак його відмова призводить 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.

It is expedient to also highlight the auxiliary control – semi-decentralized.

Now the questions of AUV group motion control are in the state of development and approbation of various theoretical approaches [28-30].

Consider these indicated ways of organizing AUV group control in more detail.

Centralized control consists in the presence, in the group, of a leader-AUV or master AUV (central control device – CCD), which controls all the AUVs in the group. All decisions are made by the leader-AUV or the main master computer, located on board the leader-AUV and are transmitted to the executive controllers of individual AUVs of the group. This computer collects information about the state of all AUVs as control objects, processes them, and each control object issues its own control command. It can be divided into single-leader and hierarchical centralized control of the AUV group.

With centralized, single-leader control, there is a leader and the others are follower-AUVs in the group. All the AUVs in the group are synchronized with the leader, as he coordinates all of them directly. All AUVs use the same controller, which operates on the basis of information about all AUVs in a group. The composition of the group controllers encodes the group control logic. The leader provides an optimal solution for a joint task, but the failure of the leader leads to the failure of the entire group.

In centralized hierarchical control, there is a hierarchy tree of control devices [34; 35]. The control center is also directly connected with each group AUV. There are sub-leaders that control the follower-AUVs in their subgroups, which are also controlled by the main AUV leader.

The leader-AUVs are equipped with high-precision navigation systems to support the follower-AUVs and each of the follower-AUVs exchange information with the leader-AUVs. The CCD controls the entire AUV group and, accordingly, plans the actions of individual groups.

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 досягну 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.

The generated control action forces action proposed for each AUV are transferred to the corresponding AUV for execution. For large groups, hierarchical control is used.

The failure of the main leader-AUV leads to the failure of the group. If the sub-leader-AUV fails, a role assignment scheme is used for identifying a new leader-AUV among the sub-group. This scheme combines techniques such as “leader-follower” approach and, fault tree analysis with fuzzy triangles [36].

Decentralized control includes the distribution of control functions between the group individual independent AUVs. Each AUV is controlled by its own controller, choosing an action (in parallel) based purely on locally observable information, the immediate environment and an observation obtained by the closest neighbors of the AUV at a given time.

Decentralized control is effective with an increase in the number of AUVs in the group. The lack of communication between the AUVs limits the achievable performance and if one of the AUVs loses contact with the command center, it is not possible to use it in the group.

There are two different approaches to the coordination and organization of the AUV group – “behavior” control and “leader-follower” control [34; 35].

Group behavior control is based on the network of intelligent behavior of AUVs in a group for certain operational functions (search, survey, measurement, etc.). Each AUV group operates independent of the other AUVs, having the ability to exchange operational data with them.

The advantage of such control is that the group dynamics provides feedback, which makes it possible to automate the process of performing a complex mission as much as possible. The disadvantage is that the group behavior and dynamics are unpredictable.

In the leader-follower control approach, AUVs are divided into two categories according to AUV capabilities: leaders and followers.

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 найближ-

There is also a combined (mixed) control according to the hierarchical principle when there are a large number of groups, and AUV groups are also divided into smaller groups [37].

Depending on the possibility of coordinating individual decisions, decentralized control strategies are divided into collective, flocking, swarm and combined control strategies [38].

In AUV group collective control method, each group AUV receives information from all AUVs and transfers the collected information about the environment and its own state to the communication channel for accessibility to all other group AUVs and optimizes the group collective actions. Each AUV independently determines its necessary actions [39].

The choice of actions by the AUV group is carried out only on the basis of information about the group goal, the current environmental situation, the current conditions and the actions of other AUV groups to achieve a common goal. Collective control strategies allow a group to remain operational in the event of failure of one or more group AUVs.

In flocking control, there is no dedicated communication channel for exchanging information between AUVs. Each AUV independently collects information about the environment and decides on its next actions to perform a group task [38].

All AUVs perform the same algorithm, and their actions are independent and asynchronous from each other. Each AUV can perform more than one operation and can change one for another. Advantage – scalability: with an increase in the number of group AUVs and the computational complexity of control tasks does not increase.

Swarm control is based on the idea of swarm intelligence [39], as in the natural world (bee colonies, ant colonies, etc.), and controls the collective behavior of similar portable and cheap AUVs with sufficient maneuverability and communication. An individual «agent» has a short communication range system only

чими 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;
- бджолиний;
- метод рою часток;
- оптимізація пересуванням бактерій;
- стохастичний дифузійний пошук;
- алгоритм гравітаційного;
- алгоритм крапель води;
- світлячковий алгоритм.

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.

with its nearest AUVs and does not require any centralized coordination.

Each AUV makes its own decisions about current behavior based on environmental data and from neighboring AUVs, which are issued in the form of local rules. The advantage of such control – more optimal solution to the information exchange problem in AUV groups to achieve collective goals [40]. There are two possible scenarios possible, by the nature of information exchange:

- when the AUV detects a target, it informs the neighboring AUVs, which transmit this information to their neighbors, as a result, it becomes known to all the group AUVs; then they change the path to the goal;

- when the AUV detects a target, but cannot report its coordinates to other AUVs; it changes the motion trajectory towards the goal; other AUVs, subject to the nearest neighbor rules, will follow it, and it will become the leader-AUV.

Below is a list of some swarm intelligence algorithms, the names of which reflect the approach essence to solving problems [16; 41; 42]:

- ant colony optimization (ACO);
- bees algorithm – BEECLUST;
- particle swarm optimization (PSO);
- bacterial foraging optimization (BFO);
- stochastic diffusion search;
- gravitational search algorithm;
- intelligent water drops algorithm;
- firefly algorithm (FA).

In semi-decentralized control, there is a local connection (link) between the AUVs. This type of group control is carried out from the centralized strategy to decentralized strategies [34] with intermediate actions and, at the same time, works for the benefit of the entire AUV group as a whole, where there are elements of both centralized and decentralized control.

In this control method, there is a leader-AUV (or CCD) that distributes tasks for other AUVs in the group. At the same time, each AUV achieves its underwater goal (target) by making its own decisions generated by its automatic control system.

1.4. Аналіз існуючих методів автоматичного керування групою АНПА

1.4. Analysis of existing AUV group automatic control methods

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

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

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

- на інфраструктурному рівні – розроблення службових алгоритмів колективної поведінки;
- на прикладному рівні – розроблення складних процедур колективної поведінки з використанням службових алгоритмів як «готових» складових елементів.

A considerable amount of research is devoted to the applied scientific problem of AUV group automatic control [17; 43-47].

Thus, in [17], the issues of decentralized uniform dispersal of the AUV group and their mission dynamic planning are considered in detail. The issues of AUV group sustainable functioning during their underwater motion are also considered.

In [43], the problem of organizing AUV team coordinated actions is considered and a generalized approach to its solution is proposed. The solution is based on the idea of AUV team self-organization, based on the principle of hierarchy («nesting») of control processes and decision-making, and on the principle of functional decomposition (task breaking into subtasks). The authors propose a set of basic service algorithms for the AUVs collective behavior, which consists of two parts: «control» (A1) and «functional» (A2):

- A1-1: AUV group self-knowledge;
- A1-2: AUV group self-naming;
- A1-3: AUV group self-coordination;
- A2-1: AUV group self-organization in space;
- A2-2: AUV group self-organization in time;
- A2-3: AUV group self-organization by parameters.

The approach proposed by the authors are two ways to solve the problem of the organization of AUV coordinated collective actions:

- on the infrastructure level – the development of service algorithms for collective behavior;
- on the applied level – the development of collapsible procedures of collective behavior with different service algorithms as «ready-made» storage elements.

However, in this work, the issues of automatic control of the AUV group safe motion are not considered.

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

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

- формування достовірної інформації про гідрофізичні та гідрохімічні характеристики підводного середовища, у якому функціонує АНПА;

- розробку високоефективних САК траєкторним рухом одиночного АНПА в умовах активної дії зовнішніх збурень;

- розробку систем автоматичного обходу статичних та динамічних навігаційних перешкод;

- розробка концепції адаптивної зміни місії одиночного АНПА в залежності від поточної підводної обстановки.

До задач навігаційного забезпечення одиночного АНПА віднесено:

- розробку системи автоматичного виявлення і розпізнавання підводних об'єктів;

- розробку системи ідентифікації та класифікації підводних цілей (одиночних і групових).

При груповому застосуванні АНПА вказаний перелік підводних задач автори доповнюють:

- задачами інформаційного обміну між апаратами групи, який включає передачу даних про власне місцезнаходження окремого АНПА та його технічний стан за результатами самодіагностики, трансляцію даних про місцезнаходження та технічний стан інших апаратів групи (при послідовній схемі зв'язку у групі), передачу даних про виявлені цілі та їхні характеристики);

- задачами розробки алгоритмів групового керування АНПА у наступних режимах: режим групового пошуку цілей на заданій акваторії, режим обстеження виявленої цілі групою АНПА, режим одночасного обстеження декількох виявлених цілей, режим ухилення від підводних об'єктів, які загрозливо маневрують;

In [44], a list of typical AUV control tasks in single and group application modes during navigation in difficult navigation conditions is formulated. The authors refer to the main control tasks:

- formation of reliable information about the hydrophysical and hydrochemical characteristics of the underwater environment in which the AUV operates;

- development of highly efficient ACS for trajectory motion of a single AUV under conditions of active external disturbances;

- development of automatic avoidance systems for static and dynamic navigation obstacles;

- development of the concept of adaptive change of single AUV missions depending on the current underwater situation..

The tasks of navigation support for a single AUV include:

- development of a system for automatic detection and recognition of underwater objects;

- development of a system for the identification and classification of underwater targets (single and group).

With the AUV group application, the authors supplement the specified list of underwater tasks:

- information exchange tasks between the group vehicles, including the data transfer about individual AUV's own location and its technical condition based on the results of self-diagnostics, data translation on the location and technical condition of other group vehicles (with a sequential communication scheme in the group), data transfer about the identified targets and their characteristics);

- development tasks of the AUV group control algorithms in the following modes: group search mode for targets in a given water area, detected target survey mode by the AUV group, simultaneous survey mode of several detected targets, evasion mode from underwater objects that threateningly maneuver;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

– рівень стратегічного керування групою АНПА, який реалізується АНПА-ліде-

– AUV self-identification tasks as a group member and the AUV group generally, as a controlled set of carriers of search equipment.

In article [44], a generalized architecture of a vehicle ACS under these conditions is also developed, which provides the following five levels of AUV ACS functioning:

– the level of formation of the external environment model in which a single AUV or a group of vehicles operate;

– the level of self-diagnostics of the AUV as a lonely functioning underwater robot and as a member of a group of underwater vehicles that carry out a joint mission;

– the level of mission planning, where, on the basis of tasks from the mission library, the initial data for controlling the AUV spatial motion are formed and the tasks for adjusting its trajectory motion under the influence of the external environment and current tasks for the AUV group are determined;

– the level of process control of underwater mission execution – ensuring spatial motion with given parameters and performing search functions by a single AUV and AUV as a member of a group of vehicles;

– the level of execution, where automatic control programs are generated for execution by mechanisms and systems – the AUV propulsion and steering complex and its search and identification complex, as well as communication programs for an individual AUV with the leader of a group of vehicles.

However, the authors of article [44] do not consider the issue of developing basic control algorithms for AUV when performing the assigned tasks.

The paper [45] presents the results of the synthesis of a multilevel ACS for AUV group control, which comprises the following levels

– the level of mega-control, at which a general plan for the organization of search underwater operations using unmanned technologies is developed, the composition of the groups of search AUVs is formed, etc.;

– the level of strategic control of the AUV group, which is implemented by the leader-

ром 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 дослідницькій 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 пропонованого 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

AUV and includes the development of the strategic behavior of the AUV group;

- the level of tactical control of the i -th AUV group, at which the actual execution of the search mission is planned and a task is developed for each AUV of the i -th group;

- the level of local control of an individual AUV in such a system based on the processing of its own navigation information and the current technical characteristics of the vehicle, information from search sensors and from its own communication system;

- the level of control of the AUV group control quality, which performs the feedback functions between individual AUVs and the corresponding levels of the multilevel AUV group ACS.

However, in article [45], the issues of synthesis, in fact, AUV ACS, which should ensure the implementation of the specified levels of functioning, is not considered.

Let us now consider the current state of research in the direction of AUV group automatic control, on the basis of the tasks of sets (1.1) and (1.2), adopted for research in the research work.

Task L_{Ag} is to ensure the navigation safety of the AUV spatial motion in the group. A number of works by both domestic and foreign authors are devoted to the issues of navigation safety [46-50].

In [46], a navigation method in a group of autonomous self-propelled «agents» was proposed, which, using satellite navigation systems GPS, GLONASS, Galileo and IRNSS, provides global, local and internal navigation. However, the application of the proposed method for underwater navigation is impossible due to the disability of these satellite systems in the aquatic environment.

Article [47] is devoted to the use of artificial neural networks for the construction of a high-precision and speed-optimal AUV ACS. As a result, the authors have obtained an ACS, which provides a change in the speed of the underwater vehicle from any initial to a

початкової до заданої за мінімальний проміжок часу. Однак, питання навігаційної безпеки у роботі не розглядаються.

У роботі [48] запропоновано структуру САК АНПА, яка має дублювання апаратної частини та резервне копіювання програмного забезпечення, що підвищує надійність її функціонування. Крім того у роботі розроблено метод керування виконавчими двигунами АНПА на основі нечіткої логіки. Це дає змогу суттєво підвищити експлуатаційні характеристики АНПА при виконанні складних підводних місій.

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

Перспективним є технічне рішення щодо керування мікро-АНПА «AR2D2», яке побудоване із застосуванням системи штучного зору [49]. САК таким АНПА дає змогу виявляти підводні об'єкти, позначені кольором і, далі, виконувати функції стеження за ними. Разом з цим, 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. Заслуговує на увагу робота [51], у якій всебічно аналізуються узагальнені методи управління групою

specified one for a minimum period of time. However, the issue of navigational safety is not considered in the article.

In article [48], the AUV ACS structure is proposed, which has duplication of hardware and backup software, which increases its operation reliability. In addition, AUV fuzzy control method of executive motors based on fuzzy logic has been developed. This makes it possible to significantly increase the operational characteristics of the AUV when performing complex underwater missions.

The proposed ACS is promising for the realization of high-quality underwater technologies; however, it requires significant refinement for use in AUV group control tasks.

A technical solution is promising for the control of a micro-AUV (μ AUV) «AR2D2», which is built using an artificial vision system [49]. ACS of such AUV allows detecting underwater objects marked with color, and, further, perform the functions of tracking them. At the same time, the proposed micro-AUV ACS does not provide for its use in a group, since it does not contain a navigation safety subsystem.

The closest approach to solving the L_{Ag} problem was approached by the authors of work [50], who solve the problems of synthesizing the AUV group control system by determining the group AUV-leader.

Such underwater vehicle tracks a given motion trajectory, and other group AUVs provide spatial configuration motion without collisions. The control signal for each AUV is calculated based on the relative position of neighboring vehicles and their own speed obtained using onboard sensors without a communication system between the AUVs. However, the work does not contain information about the technical implementation of the ACS and has a search character.

The development task B_{Gr} of basic operation algorithms of the AUVs in the group. Article [51] deserves attention, which comprehensively analyzes AUV group control

АНПА: метод віртуальної структури, метод на основі поведінки, метод «лідер-послідовник» та метод штучного потенціалу поля. Також у роботі проаналізовано особливості та труднощі управління групою АНПА, особливо для багатоагентної системи.

Крім того, виконано аналіз критичних технічних проблем, які узагальнені як три напрямки: проблема динамічної складності АНПА; проблема екологічної складності застосування групи АНПА; проблема серйозних обмежень, пов'язаних з реалізацією надійного підводного зв'язку між АНПА-«агентами» групи.

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

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

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

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

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

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

generalized methods: the virtual structure method, the behavior-based method, the “leader-follower” method and the artificial potential field method. The paper also analyzes the features and difficulties of AUV group control, especially for a multi-agent system.

In addition, the analysis of critical technical problems, which are generalized in three directions, is carried out: the problem of AUV dynamic complexity; the problem of environmental complexity of using the AUV group; the problem of serious limitations associated with the implementation of reliable underwater communication between the group AUV – «agents».

However, the solutions of specific AUV group control tasks are not presented in the work.

The development task L_{Gr} of control algorithms of certain maritime search operations. Since search operations are one of the main tasks for the group application of AUVs, a significant number of foreign publications are devoted to their algorithmization [52-56].

The research [52] is devoted to the analysis of AUV group behavior strategies when choosing optimal routes during motion in a completely defined environment, taking into account the restrictions on the energy resources of the AUVs and the need for information exchange between them. To distribute targets between AUVs, the authors use a genetic algorithm that chooses the order of traversing targets according to a specified objective function.

The results of the work can be used as the basis for planning search missions for an AUV group as one of the options for constructing basic algorithms for group control; however, they require additional researches for application in maritime practice.

Article [53] examines the advantages of building integrated AUV control systems and the implementation based on their multi-agent technology of AUV group control. It is shown that the advantages of AUV control integration include:

– зменшення масогабаритів та енергоспоживання електронної апаратури завдяки використанню єдиного обчислювального модуля та єдиної системи енергоживлення;

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

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

– агентів для комунікацій та планування поточних підводних місій;

– агентів для адаптивної оптимізації роботи групи АНПА в активному і пасивному режимах;

– агентів для управління, відповідно, активними і пасивними режимами роботи АНПА.

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

У роботі [54] розглядаються принципи побудови розподіленої мультиагентної системи для керування угрупованням роєм АНПА для розподіленого виконання завдання патрулювання заданої акваторії.

Автори пропонують нову методичну основу для розробки розподілених інтелектуальних систем колективного керування рухомими робототехнічними об'єктами нового покоління, що дозволить вирішувати важливі завдання погодженої діяльності групи АНПА і забезпечить такі важливі переваги як гнучкість і ефективність, продуктивність і масштабованість, надійність і живучість системи.

– improving the control efficiency due to the possibilities of operation algorithm optimizations of all the system elements;

– reduction in mass dimensions and energy consumption of electronic equipment due to the use of a single computer module and a single power supply system;

– the possibility of applying the principles of unification of software and technical solutions of ACS for various types of AUVs.

The paper presents a sequence of stages of typical search missions and discusses the decomposition of complex agents of a multi-agent system into less complex agents of subsystems. It is valuable to divide agents into:

– agents for communications and planning of current underwater missions;

– agents for adaptive optimization of AUV group mission in active and passive modes;

– agents for control, respectively, of active and passive modes of AUV operation.

This makes it possible to qualitatively organize the tasks of illuminating the underwater situation in the working area, to resolve issues of navigation and hydroacoustic communication between AUVs, and to control the technical means of individual AUVs. However, information sufficient for the practical implementation of multi-agent technologies is not provided in the work, which necessitates additional applied research to create the theoretical foundations for building the AUV group ACS.

In [54], the principles of constructing a distributed multi-agent system for controlling a AUV swarm grouping for distributed execution of the task of patrolling a given water area are considered.

The authors propose a new methodological basis for the development of distributed intelligent systems for collective control of mobile robotic objects of a new generation, which will allow solving important problems of coordinated activities of the AUV group and provide such important advantages as flexibility and efficiency, productivity

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 угрупуванням АНПА вимагає застосування мережецентричного підходу в створенні багатогентної «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.

and scalability, reliability and survivability of the system.

AUV autonomy is ensured by the presence of an individual intelligent control system (ICS) for each vehicle, capable of reacting to events, planning its operation to achieving its goals and to communicate with other vehicles.

The software components of the underwater mission of the developed system are designed to solve local problems:

- ensuring observation of a certain area of the water area;
- selection of a safe route of motion;
- maintaining the required battery charge reserve;
- providing communication sessions with the database;
- identification of certain targets from the given list (tasks for each AUV).

The proposed adaptive planning method is based on the introduction of satisfaction functions of each system agent, describing the deviations of the parameter attributes from the desired ideal values.

The general principle of building a distributed control system of the AUV grouping requires the use of a network-centric approach in the creation of a multi-agent «system of systems» coordinately interacting on the basis of *p2p* principles (a variant of the system architecture based on a network of peer nodes) interconnected via a common bus.

At the same time, it becomes possible to create a system as self-organizing and in which the directive command center for decision-making, while retaining all the possibilities for setting tasks, coordinating and evaluating the results, does not control the processes, but uses the direct interaction of «agents» with each other to coordinate decisions. This makes it possible to obtain an AUV group ACS of a new type – «command intelligence».

The results obtained by the authors are a promising direction in the development of «swarm» technologies of group control; however, they require additional applied scientific research for application in marine practice.

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 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.

Quite burdensome and important, for theory and practice, scientific results were obtained during the implementation of the European project «GREX», which was jointly carried out by universities and technical firms from Great Britain, France, Germany, Portugal and other countries of the European Union during 2006-2009 [55].

The project provided for the marine full-scale tests to confirm the concept of group application of two AUVs and two catamarans (unmanned surface vessels, USV), which had internal mobile communication for a number of autonomous underwater missions, for which it was necessary to plan and perform maneuvers and cooperative actions (Fig. 1.6).

The scientific results obtained by the European team confirmed the viability of the concept of the group use of AUVs and unmanned surface vessels to carry out joint maritime missions in uncertain operating conditions [55; 56].

However, the authors do not provide specific scientific and technical solutions that could be used for the practical construction of similar marine systems.

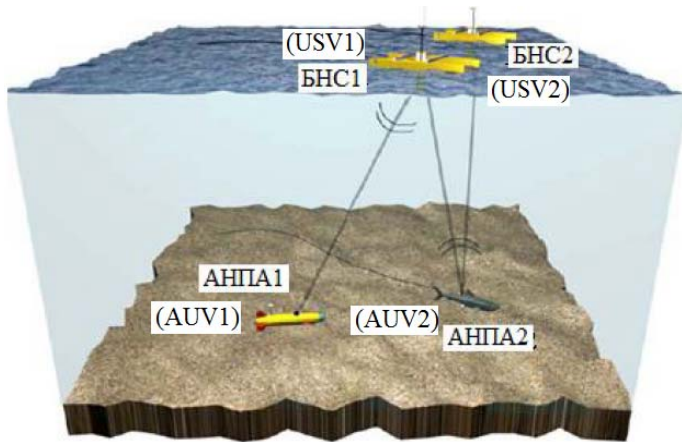


Рисунок 1.6 – Робототехнічні складові проекту Євросоюзу «GREX»
 Figure 1.6 – Robotic components of the European Union project "GREX"

1.5. Актуальні задачі автоматизації пошукових підводних операцій і постановка задачі дослідження

1.5. Relevant objective of search underwater operations automation and research problem statement

Аналіз стану проблеми застосування засобів морської робототехніки для виконання пошукових підводних операцій свідчить, що використання групових технологій застосування АНПА знаходиться на початковій стадії і належить до магістральних напрямків розвитку морських технологій.

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

До головних переваг групового застосування АНПА слід віднести:

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

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

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

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

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

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

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

Analysis of the problem state of using marine robotics tools for performing search underwater operations demonstrates that the use of AUV group technologies is at an early stage and is related to the marine technology development main directions.

Let us consider the generalized indicators of the AUV group application in search operations, based on the SWOT analysis [57].

The main advantages of the group use of AUVs include:

- high productivity of underwater search operations, since they are carried out in large areas of water with the involvement of AUV group, and the number of underwater vehicles in the group may vary depending on the requirements for the total duration of the search operation [58];

- low financial costs for carrying out marine operations, since cheap AUVs are used for their implementation, the cost of creating which is 2-3 orders of magnitude lower than the cost of traditional AUVs of a small class [59].

The main disadvantages of AUV group application that hinder widespread of group AUV application technologies, include:

- the complexity of the AUV group coordinated mission automation when performing a cooperative search mission;

- the complexity of the accident-free AUV group motion ACS development under the influence of external disturbances of natural and/or anthropogenic origin;

- the communication system organization complexity between the AUV group «agents» and the absence of an «online» connection between the AUV group and the search operation coastal control center;

- the existence of risks of losing part of the group's underwater vehicles due to external factors, ACS software failures or technical failures of individual AUVs.

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

Тому у дослідницькій 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.

Thus, most of the problematic issues, the solution of which will open up the possibility of industrial use of group technologies for AUVs, related to the development of highly efficient automatic control systems for the AUV group and individual AUVs as group «agents».

Therefore, in the research work, as the most relevant for the domestic science current state, solutions to the following main tasks of the AUV group application automation are considered:

– for the first direction C_{Ag} of Co-Co-Ro automation – technologies – of the automatic motion control tasks of a single AUV as a group «agent» in conditions of navigational proximity of other AUVs;

– for the second direction C_{Gr} of Co-Co-Ro automation – technologies – of group search automation tasks as one of the basic control algorithms for a group of AUVs and tasks of control automation of certain types of maritime search operations.