

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОВИМ РУХОМ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ПОШУКОВОГО ТИПУ

CHAPTER 3. SYNTHESIS OF AUTOMATIC GROUP MOTION CONTROL SYSTEMS OF SEARCH AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

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

3.1. Modern AUV group underwater search missions and their execution automation features

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 пошук підходів до розробки систем групового керування АНПА як основи створення 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].

At the present phase of underwater robotics development, the applied scientific task of classifying the methods of AUV group motion, taking into account their technical features, the underwater environment characteristics and the properties of the underwater objects, is relevant. The solution of this task will allow creating a theoretical basis for the synthesis of a new type of ACS of marine mobile objects – the AUV group control system.

Note that a significant number of modern scientific publications are devoted to AUV group application issues [14; 32-35; 37; 38; 58; 101-102]. However, currently there is still no unified classification system for the AUV group application methods as a development basis of the appropriate motion control organization methods of a group of underwater vehicles.

Therefore, the creation of the classification of AUV group application methods for underwater exploration and related approaches to the development of AUV group control systems as a basis for creating highly efficient automation systems for complex underwater operations performed in large water areas are relevant applied scientific tasks.

Based on the experience of successful AUV group application by the World's Leading Maritime Nations, as well as on the basis of real underwater search tasks in the interests of Ukrainian organizations, the following classification of underwater tasks and methods of solving them using the AUV group is proposed (Table 3.1) [103].

Таблиця 3.1. Типові підводні місії та типи організації руху групи АНПА
 Table 3.1. Typical underwater missions and types of AUV group motion organization

Типова місія (Typical mission) Типовий Рух (Typical motion)	Пошук затонулих об'єктів (Search of sunken objects)	Картографування донної поверхні (Bottom surface mapping)	Моніторинг підводного середовища (Underwater environment monitoring)	Обстеження протяжних об'єктів (Inspection of extended objects)	Наукові дослідження підводного середовища (Underwater environment scientific research)	Восне застосування (Military application)
Централізоване керування (Centralized control)						
Рух фронтом (Front (line) motion)	+	+	+	+	+	+
Рух уступом (Ledge (echelon) motion)	+		+		+	+
Рух клином (Wedge motion)	+		+		+	+
4. Радіальний рух (що сходиться та розходиться) (Radial motion (converging and diverging))	+		+		+	+
5. Рух по колу (Circular motion)	+		+	+	+	+
6. Рух по концентричних колах (Motion in concentric circles)	+		+	+	+	+
7. Рух по спіралі (Spiral motion)	+		+	+	+	+
8. Просторовий рух (Spatial motion)	-		+		+	+
Децентралізоване керування (Decentralized control)						
9. Ройовий рух (Swarm)	+		+		+	+
10. Зрайний рух (Flock motion)	+		+		+	+
11. Колективний рух (Collective motion)	+		+		+	+

Перші чотири типи організації руху включають синхронізований або несинхронний рух групи з N АНПА на вказа-

The first four types of motion organization include synchronized or asynchronous motion of a group of N AUVs on specified straight

них траєкторіях прямої лінії. У той же час лінійні швидкості АНПА можуть бути однаковими ($v_i=v_j$) або різні ($v_i \neq v_j$).

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

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

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

Розглянемо специфіку організації централізованого керування групою АНПА.

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

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

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

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

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

line trajectories. At the same time, the AUV linear velocities can be the same ($v_i=v_j$) or different ($v_i \neq v_j$). In this paper, the ratio ($v_i=v_j$) is adopted.

The next four types of AUV motion include the motion of vehicles along calculated curvilinear trajectories, which impose additional functions for their control system based on the current calculation of the motion parameters of the i -th AUV as an agent of a multi-agent search underwater system.

These first eight typical types of group motion are implemented using the principles of central control, when the motion parameters of each vehicle as a group element are issued/given by a central control device (CCD) (for example, a group control post on the leader AUV or on a support vessel).

In turn, such a post receives information about the current state of all AUVs and the external environment.

Consider the specifics of the AUV group centralized motion organization.

The front (line) motion provides for a linear arrangement of AUV (numbered circles) with equal distances h between them in the search mode, Fig. 3.1, a [42].

The value of h is selected taking into account the width s of the working area of the AUV search equipment, but not more than the radius r_c of the onboard communication systems of the vehicles:

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

Typically, the distance h is chosen with a small «overlap» of the width s of the AUV search equipment working area to guarantee the study of the bottom surface without gaps.

When one of the vehicles detects an underwater object (search target), its coordinates are transmitted to other vehicles, which leads to the fact that the AUV team will switch to another mode of operation (for example, reconfiguration for survey or tracking of a moving object).

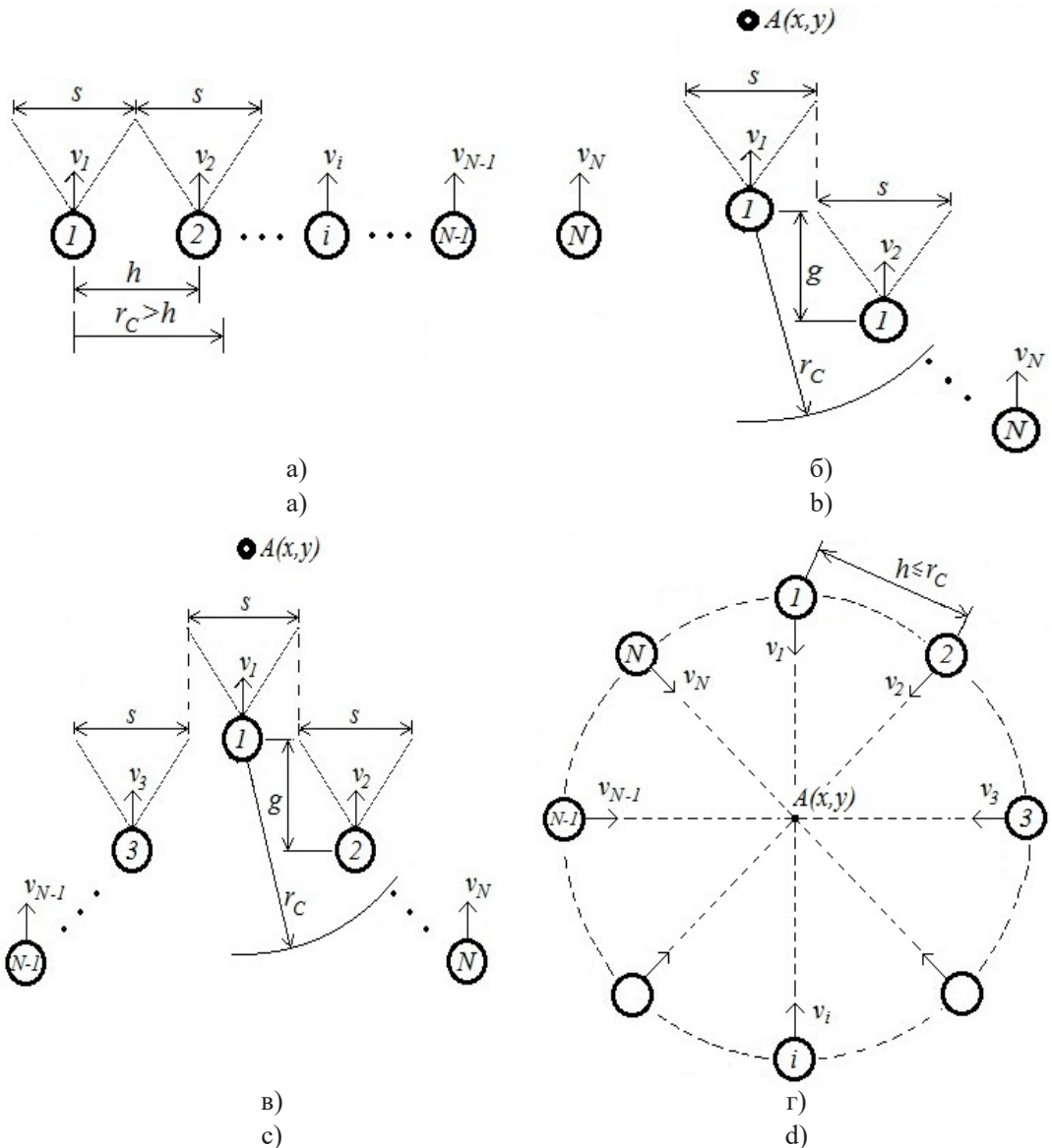


Рисунок 3.1 – Прямолінійні рухи групи АНПА
 Figure 3.1 – AUV group rectilinear motions

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 безпеки, але не більше дальності r_c дій бортових систем зв'язку апаратів:

The ledge motion (Fig. 3.1, b) is used to search for explosive objects, when their operation at a distance p can damage the neighboring AUV.

Stepwise displacement of AUV g is selected taking into account the safety, but not more than the range r_c of the onboard communication systems of the vehicles:

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

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

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

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

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

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

Радіальний рух групи АНПА, що розходиться застосовується:

- для пошуку цілі в робочій круговій зоні з розташуванням судна-носія групи АНПА в центрі;
- як перехідний рух для організації інших видів руху.

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

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

$$h_{min} < h_3 < r_c$$

де h_{min} – мінімальна безпечна відстань між сусідніми АНПА.

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

Wedge motion is applied when search target – sunken object (SO) – probable location, is known, Fig. 3.1, in [42]. In this case, the group motion is constructed so that the wedge tip is directed to point $A(x; y)$ with the target probable coordinates, and the AUV stepwise shift g is selected based on AUV on-board communication systems range r_c or the nearest AUV approach operational time t_0 to the found targets:

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

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

where: v_i is the linear velocity of the i -th AUV.

AUV group radial converging motion is used in the event, if one of the AUVs detects the desired object, that needs to be found, with coordinates $A(x, y)$ and deciding on its comprehensive survey or escort. Fig. 3.1, d shows an example of the initial location of the AUV group, which previously moved in a circle. Generally, the initial position of the AUV can be arbitrary, however, their velocity vectors after the command to the converging radial motion should be directed to the point $A(x, y)$.

AUV group radial divergent motion is used:

- for a target search in the working circular zone with the AUV group carrier vessel location at its center;
- as transitional motion for organizing other types of motion.

Group circular motion is proposed by the author as an intermediate form of motion in the formation of the AUV group, after which it is reconfigured to perform a specific mission (Fig. 3.2, a).

The main purpose of this movement is to keep the distance h between the vehicles no more than r_c .

$$h_{min} < h_3 < r_c$$

where h_{min} – minimum safe distance between the neighboring AUVs.

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.

Motion along concentric trajectory-circles (Fig. 3.2, b) is proposed if in one group of N there are vehicles with different technical characteristics, for example, with different speeds of movement, with different indicators of autonomy of work. In these cases, the assignment of a specific AUV to the i -th circle is carried out on the basis of the most complete survey of the working area with the simultaneous completion of the mission of each vehicle.

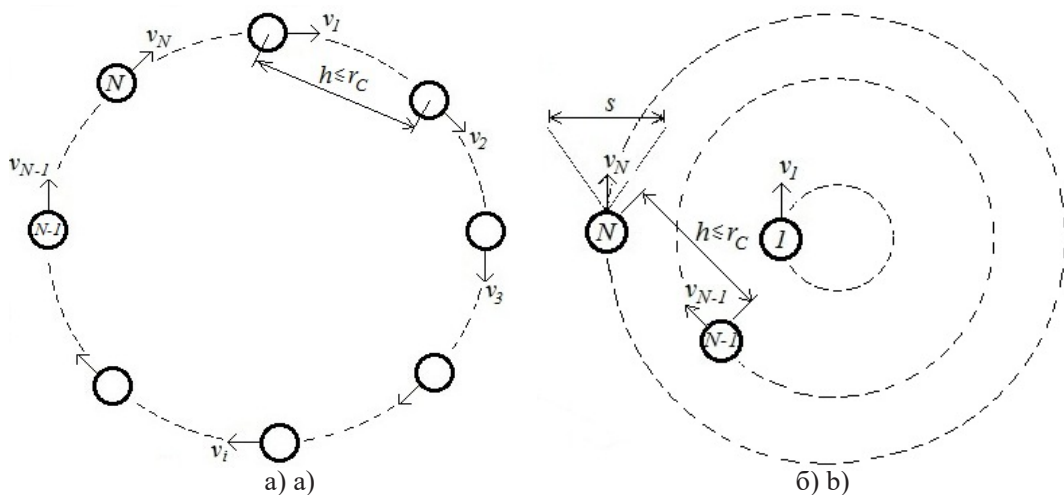


Рисунок 3.2 – Криволінійний рух групи АНПА
Figure 3.2 – Curvilinear motion of the AUV group

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:

At the same time, the distance h between the AUVs moving in adjacent circles should not exceed the action radius of the onboard communication systems of the vehicles r_c (3.1).

Consider the organization of motion control of a group of N vehicles on concentric trajectories using the example of a survey of the circular working area of the bottom surface area S_{UM} . If the width of the working area s of the AUV search vehicle is known, then the number of the underwater vehicles in the group (provided that there is only one AUV on each circular trajectory) can be determined from the relation:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

and the radius r_i of the i -th circular trajectory for the i -th AUV can be determined from the expression:

Then, when all AUVs in the group are numbered by increasing their speed v_i , determine the total time of the underwater mission T_{UM} from the expression:

where \inf is the operator for selecting the smaller member of the set $\{T_1, \dots, T_N\}$; v_i – the linear velocity of the i -th AUV.

AUV group motion along the Archimedes spiral (Fig. 3.3) is proposed by the author to survey the circular work area with maximum productivity in a limited number of AUV in the group.

To control this type of AUV group motion, it is first necessary to construct the Archimedes spiral in the polar coordinates $r = s\varphi$ with a step of no more than the width of the working band s of the AUV search vehicle. Then we take $k_s = s$.

The area of the constructed spiral S_A should be equal to the area of the working zone – the circular search zone on the bottom surface (the center of the spiral should be at the point $A(x;y)$ with the probable coordinates of the target location):

where r , φ are, respectively, the current values of the radius vector and the polar angle; φ_M is the polar angle of the Archimedes spiral with area S_{UM} .

Then the number of turns of the Archimedean spiral w_{UM} at a given area $S_A \geq S_{UM}$ is found from the relation:

Assuming that $s \ll R_{UM}$ and, consequently, the outer turns of the spiral are close in shape

кіл, знаходимо полярний кут розрахованої спіралі Архімеда:

to the circles, the polar angle of the calculated Archimedes spiral is found:

$$\varphi = 2\pi w_{UM}; \tag{3.10}$$

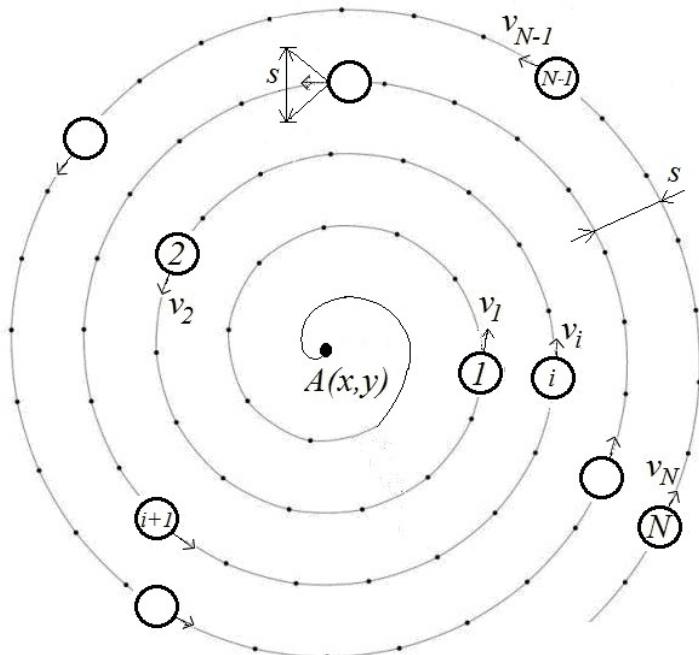


Рисунок 3.3 – Рух групи АНПА по загальній спіралі
Figure 3.3 – AUV group motion in a common spiral

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

The Archimedes spiral length L_{UM} with step s , which will cover the area of the circular working area S_A , is found from the relation:

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

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

where $\varphi = 2\pi w$ – the polar angle of the calculated Archimedes spiral.

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

With a given number of N of the same type of underwater vehicles in the mission, the length l_{AUV} distance which must pass a separate AUV in the group, is determined by the ratio:

$$l_{АНПА} = L/N, \tag{3.12}$$

$$L_{AUV} = L/N, \tag{3.12}$$

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

and at a known speed of AUV v , the mission time T_M is from the expression:

$$T_i = l_{АНПА} / v. \tag{3.13}$$

$$T_i = l_{AUV} / v. \tag{3.13}$$

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

Then the total time spent on the search mission T_{UM} is from the expression:

$$T_{UM} = T_i = l_{АНПА} / v. \tag{3.14}$$

$$T_{UM} = T_i = l_{AUV} / v. \tag{3.14}$$

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

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

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

Таким чином, залежності (1) – (14) дають змогу автоматизувати одне з трьох основних завдань керування групою пошукових АНПА – завдання Z_{PM} планування підводної місії для групи АНПА в умовах обмежень щодо кількості N підводних апаратів в групі та часу виконання підводної місії T_{UM} (другий напрямком 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 напрямком 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

Knowing the distance length l_{AUV} for the i -th AUV group and taking into account the dependences $r=s\varphi$, from relation (3.10) we can calculate the polar coordinates $\{r_p, \varphi_i\}$, which are the starting point for the i -th AUV group. Each AUV must occupy its starting point, after which the coordinated movement of «agents» along the sections of the spiral allocated to them is performed.

As a result of such control organization, all group AUVs complete the survey of a given water area at the same time.

Thus, dependences (1) – (14) allow to automate one of the three main tasks of AUV search group control – underwater mission planning task Z_{PM} for AUV group in the conditions of restrictions on the number of N underwater vehicles in the group and time T_{UM} of underwater mission (other direction C_{Gr} of automation Co-Co-Ro – technologies according to paragraph 1.5).

They form an analytical basis for estimating the required amount of AUVs for underwater search operations, including taking into account the individual characteristics of AUV in terms of speed. These dependences can be used in the synthesis of the automatic control system of the leader AUV-1.

In addition to the task Z_{PM} , the following tasks are also relevant tasks for AUV group motion automation:

- tasks Z_{GC} of the AUV group automatic motion control system synthesis, selected to perform the specified underwater mission, which provides the coordinated motion of underwater vehicles on assigned trajectories (the second direction of C_{Gr} automation of Co-Co-Ro – technologies according to paragraph. 1.5); the solution to this problem should be synthesized laws and control algorithms of the AUV group coordinated motion, which ensure maximum productivity of the group and high reliability of information exchange by controlling the distances between the group «agents»;

- task Z_{AC} synthesis of automatic control system of a single AUV as a group «agent»

близькості інших АНПА, результатом вирішення якого мають бути закони та алгоритми автоматичного керування траскторним 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.

in terms of navigational proximity of other AUVs, whose solution should be the automatic control laws and algorithms of AUV trajectory motion (the first direction C_{Ag} of automation Co-Co-Ro – technologies according to section 1.5).

Thus, the current state of the AUV group application problem, as the most productive form of underwater exploration in large waters, requires a scientifically sound solution to the complex task Z_{MAS} of their coordinated group motion automation, and many major automation tasks contain three tasks groups [33]:

Below are the solutions to the above Z_{GC} tasks; Z_{AC} for the most complex variants of AUV group motion.

3.2. Автоматизація керування морським безекіпажним комплексом із групою пошукових АНПА

3.2. Control automation of a marine unmanned complex with a group of search AUVs

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 [109]. За такої технології підводні апарати мають гідроакустичний зв'язок між собою, що забезпечує їх колективну роботу і високу її продуктивність.

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

Доставку групи АНПА в район проведення пошукових робіт доцільно виконувати за допомогою безекіпажного надводного судна (БНС, в англійській літературі – Unmanned Surface Vessel, USV) [110]. Це виключає необхідність кож-

3.2.1 General formulation of a typical task of MUC automatic control with a group of search AUVs. The group application of AUVs is one of the effective technologies for conducting unmanned maritime search underwater missions, which guarantees prompt inspection of large areas with minimal time [109]. With this technology, underwater vehicles have sonar connection between them, which ensures their teamwork and high productivity.

However, the transition of the group AUVs to a given remote area to perform their search mission usually requires an increased resource of their onboard power supplies. This necessitates the use of AUVs with high energy supplies, which increase the total cost of maritime search operations.

It is expedient to carry out the delivery of the AUVs group to the search operation area using the unmanned surface vessel (USV) [110]. This will eliminate the need for each AUV to perform a long-distance maritime

ному АНПА виконувати дальній морський перехід до заданої акваторії пошуку, дасть змогу використовувати АНПА з відносно низьким енергозабезпеченням, яке достатнє для маневрування біля БНС, групового переходу до робочої зони акваторії та виконання власне підводної пошукової місії.

Для виконання морської пошукової місії автором пропонується застосування морського безкіпажного комплексу (МБК) у складі БНС та розташованої на його борту групи АНПА [107]. За міжнародною класифікацією вони іменуються мультиагентними підводними системами (МАПС) й успішно застосовуються у морських екологічних та археологічних дослідженнях [108; 109].

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

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

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

2 – обчислення необхідної кількості АНПА в групі для виконання пошукової

transition to a given search water area; will allow the use of AUV with relatively low energy supply, which is sufficient for maneuvering the USV, a group transition to the water working area and the actual underwater search mission.

To perform the maritime search mission, the author proposes the use of a maritime unmanned complex (MUC) as part of the USV and the AUV group located on board [107]. According to the international classification, they are called marine multi-agent systems (MMAS) and are successfully used in marine ecological and archaeological research [108; 109].

The main tasks of creating such a complex include determining the modes of its operation and the development of a generalized automatic control system (ACS) of a complex in these modes. In particular, it is necessary to ensure the MUC automatic transition to a given point of the water area, release of AUV group into the sea, group transition of AUV to the water area working zone and their deployment (dispersion) for implementation of AUV-1 return of the AUV group aboard the USV after completing the underwater search mission.

3.2.2 Development of underlying (basic) robotic technology for automatic execution of underwater search missions using the MUC. Modern experience in the creation and use of maritime robotics equipments [3; 25; 39] allows to identify the following ten main stages of implementation of the underlying technology of marine underwater search missions A_{MUC} based on the use of MUC with a group of search AUVs on board [107] (Fig. 3.4):

1 – MUC automatic transition SC_{MUC1} from the port of departure to the designated point of the sea area concerned, where the launch of the AUVs group is planned;

2 – calculation of the required number of AUVs in the group to perform the search mission (see paragraph 3.2) and automatic launch (release) of the group from the USV

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.

board in the sea RS_{AUV} at a predetermined point of the sea area;

3 – self-organization (automatic formation) of the released AUVs to F_{MAS1} group for collective transition to the working zone, where the underwater mission will be performed;

4 – automatic group transition of launched AUVs T_{MAS1} to the working zone of this water area;

5 – automatic occupation of the group of initial position S_{MAS} by each AUV for coordinated spatial motion in a predetermined search trajectory;

6 – AUVs group automatic implementation of the underwater search mission to the designated point J_{MAS} (for example: search, identification and mapping of underwater objects);

7 – self-organization (automatic assembly) of AUVs into group F_{MAS2} for return to the USV;

8 – automatic group transition of AUVs to USV T_{MAS2} ;

9 – automatic return of the AUVs group aboard the USV CS_{AUV} ;

10 – automatic transition of MUC SC_{MUC2} to the home port.

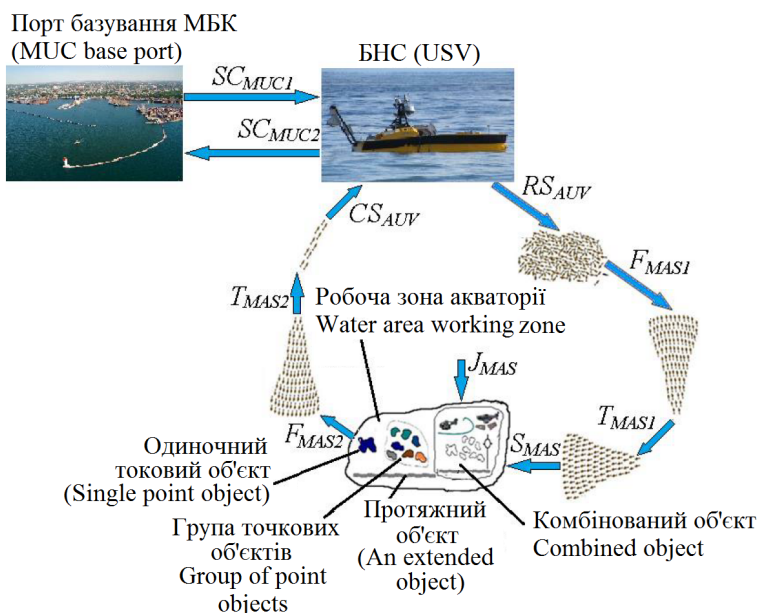


Рисунок 3.4 – Узагальнена схема керування МБК з групою пошукових АНПА
 Figure 3.4 – Generalized MUC control scheme with a group of search AUVs

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

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

Розглянемо тепер основні особливості організації керованого руху МБК при проведеної 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 судового 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,

Thus, the main implementation stages of the basic robotic mission of the automatic execution of underwater search missions A_{MUC} using the MUC can be represented by the set [110]:

Let us now consider the main features of the MUC controlled motion organization during the maritime search operation.

The first and the tenth stages ($SC_{MUC1} \in A_{MUC}; SC_{MUC2} \in A_{MUC}$) provide for the USV automatic motion with the AUVs group aboard from the port of departure to the scheduled point of release. Usually, such a transition occurs under conditions of external perturbations – wind and wave influences, flow, the appearance of navigational obstacles, etc. Therefore, the main requirements for the automatic control of USV motion are to ensure the safe motion of the vessel with a given trajectory with the estimated speed. At these stages of MUC mission, the known ACSs, created for the control of the USV can be used [111].

Automatic launch of the AUV group from the USV board to the sea to the point with the predetermined geographic coordinates of the underwater search start ($RS_{AUV} \in A_{MUC}$ second stage) and the automatic return of the AUVs group to the USV after the completion of the underwater search ($CS_{AUV} \in A_{MUC}$ ninth stage) are complex scientific and technical tasks. Their solution is possible with the help of the vessel's executive (actuation) mechanism such as «AUV Launch & Recovery System» [115], when a special underwater garage (UG) is lowered from the MUC board for the release/return of the duty AUV.

At the same time, the USV is automatically positioned at the point of AUVs release (P_{USV} mode).

The synthesis of such mechanisms and control systems is a separate applied scientific and technical problem and is not considered in this work.

Note that an important component of the second phase RS_{AUV} is the preparatory

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 $F_{MASI} \in A_{MUC}$) 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 розходитьсья, 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

component, which determines the necessary and sufficient number of AUV in group N , which needs be launched into the sea to successfully complete the mission.

The automatic formation of the AUVs released into the group, (third stage $F_{MASI} \in A_{MUC}$) for a collective transition to the working zone, where the underwater mission will be performed, forms a separate scientific task. The peculiarity of the automatic control of the search mission indicated stage is the need to move the AUVs along special trajectories of waiting.

Such trajectories should provide for the content of the first released AUVs in the group in the process of releasing the next batch of underwater vehicles. It is advisable to first perform the release of the AUV-leader, which will form the trajectory of waiting.

When forming a plane (two-dimensional) AUVs group, such trajectories may take the form of an Archimedes spiral, diverging from the spiral pitch $a \leq r_c$, where r_c is the range of the AUVs underwater communication system.

When forming a bulk (three-dimensional) AUVs group, the trajectory of waiting may take the form of several such spirals located at predetermined depths.

When forming a three-dimensional (3D) group of AUVs, the waiting trajectory can take the form of several flat spirals located at specified (predetermined) depths.

In the first case, when using the executive mechanism of the conveyor type, the vessel's ACS, which controls the release of underwater vehicles, must carry out the release of AUVs with time interval:

where $d < s_{AUV} < r_c$ is the segment of the released AUV spiral trajectory; d is the minimum safe permissible distance between the neighboring AUVs; v_{AUV} is the linear motion velocity of the released AUV.

When using the release mechanism of the cassette-type AUV, part of the group of underwater vehicles falls into the water at the same time. Then the formation of the waiting

одночасно. Тоді формування траєкторії очікування для них може виконувати тимчасовий АНПА-лідер цієї частин 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 $T_{MASI} \in A_{MUC}$) доцільно виконувати одразу після випуску останнього АНПА групи. Початком руху кожного підводного апарата в групі на заданій глибині h_{MASI} заданим курсом φ_{3MASI} та з заданою швидкістю v_{MASI} 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 АНПА-сусідами.

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 навігації

trajectory for them can be performed by the temporary ANPA leader of this part of the group.

In the second case (the formation of the three-dimensional AUVs group), the vessel's ACS should begin to form the AUVs spiral trajectories of waiting from the highest given depth and complete the minimum predetermined depth.

In this case, the ACS of each released AUV must provide its plane motion along the Archimedes' spiral with a pitch $a \leq r_c$.

Group transition of the released AUVs. It is advisable to carry out a group transition of the released AUVs to the predetermined water area working zone (the fourth stage $T_{MASI} \in A_{MUC}$) immediately after the release of the last group AUV. The beginning of the motion of each underwater vehicle in the group at a given depth of h_{MASI} , given course φ_{MASI} and with a given speed v_{MASI} should be a common team, which is drawn from the USV ACS or from the AUV-leader [116; 98].

One of the main automation tasks of this maritime search mission phase is AUV trouble-free coordinated motion without loss, i.e. without the collision of the neighboring underwater vehicles (vehicles excessive close approach) and without losing the connection (communication) between them (vehicles excessive distancing).

The automatic occupation of the initial position by each of the AUV (fifth stage $S_{MAS} \in A_{MUC}$) for the coordinated spatial motion on the predetermined search trajectory is performed in accordance with the survey plan of a given water area, which has been pre-drawn up and entered into each AUV ACS.

At the same time, motion without losses is also ensured – preventing AUV collisions and moving out of the range of underwater communication systems between neighboring vehicles.

The AUVs group automatically performs the underwater search mission (sixth stage $J_{MAS} \in A_{MUC}$) by the AUVs group coordinated motion to specified trajectories [42].

Navigation support for this mission stage can be organized using a bottom navigation system, pre-installed in the search area

йних АНПА, оснащених GPS-приладами для визначення власних географічних координат, та гідроакустичними системами навігаційної підтримки підводних робіт [114].

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

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

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

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

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

На рисунку позначено:

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,

(see paragraph 2.4), or using navigation AUVs, equipped with GPS devices to determine own geographical coordinates, and hydroacoustic systems navigation support underwater operations [114].

An important automatic control component of this mission phase is also the AUVs group motion without collisions and loss of communication between the vehicles.

The AUVs automatic assembly into a group after the completion of the search operation to return to the USV (seventh stage $F_{MAS2} \in A_{MUC}$) is performed by the AUV-leader's command. In the course of its implementation, the trajectory of waiting is formed by analogy with the third stage F_{MAS1} .

After collecting the full AUVs group, by the AUV-leader's command, starts the *group transition to the USV* (seventh stage $T_{MAS2} \in A_{MUC}$).

The motion of each underwater vehicle in the group at a given depth of H_{MAS2} , at a given course φ_{MAS2} and at a given speed v_{MAS2} should be without loss – without collisions of neighboring vehicles and without loss of hydroacoustic communication between them.

The underlying unmanned technology for performing maritime underwater missions of a search nature with the help of MUC, will be presented in the form of sequence of execution (algorithm) of the stages described above, Fig. 3.5.

The figure shows:

У1... У10 – conditions for performing the steps of the set (3.23) of implementing the basic robotic technology A_{MUC} of automatic execution of search underwater missions using the MUC;

x_1 – the planned course of the process of execution of the corresponding stage of the mission;

x_2 – planned completion of the corresponding stage of the mission;

x_3 – unplanned stage progress, requiring access to the MUC ACS of higher level (transition В).

Other symbols on Fig. 3.6 correspond to (3.16).

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.

Additionally, Fig. 3.5 shaded shows unmanned technology blocks, whose implementation is based on the author's researches. The obtained algorithm can serve as a basis for synthesizing the generalized structure of the MUC ACS during (when performing) underwater search missions.

Thus, the task of ensuring trouble-free AUV automatic motion with a given heading φ_{MAS1} , with a given speed v_{MAS1} is a typical task for the group motion of any follower AUV.

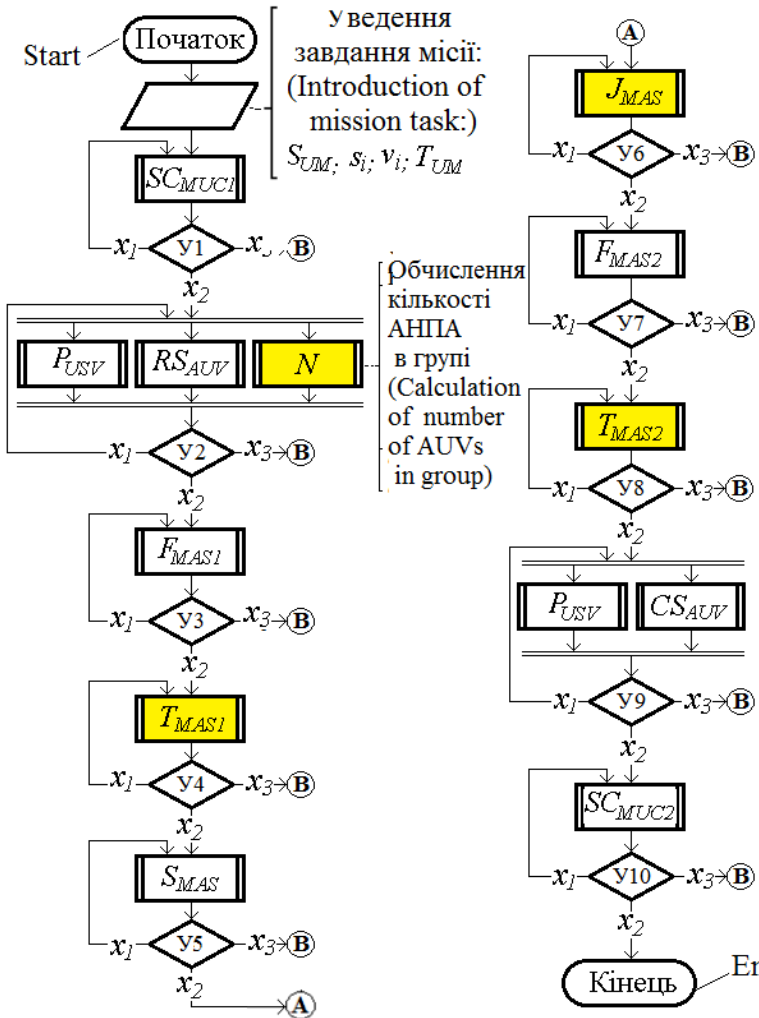


Рисунок 3.5 – Базова безпекажна технологія виконання пошукових підводних місій за допомогою МБК

Figure 3.6 – The underlying unmanned technology of the search for maritime underwater missions using the MUC

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

3.3. Synthesis of the automatic control system of the follower AUV as a group "agent"

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

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

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

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

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

Постійний прогрес у технології підводних апаратів і акустичного зв'язку зробив реальним скоординоване керування групою АНПА, яка може складатися з функціонально 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].

3.3.1. Analysis of existing scientific and technical solutions and problem statement of ACS synthesis. In many maritime operations, the AUV group use is more productive than the use of a single AUV.

This is due to the high reliability and speed of underwater operations.

Given these benefits, the degree of autonomy of each AUV in the group should be high.

Thus, at the present time, the relevant applied scientific task of control automation of a group individual AUV is its motion ACS synthesis under the conditions of group transition (GT). Such a system should prevent collisions or excessive increase in the distance between neighboring AUVs, which can cause, respectively, an emergency or the disintegration of the group and the failure of the underwater mission.

In modern scientific literature, AUV navigation problem is divided into global navigation, which involves planning the path that leads the vehicle to a given point in the underwater space, and local navigation, which is subordinate to the global and ensures the trouble-free movement of an individual AUV in a group.

The development of autonomous robotic navigation methods is one of the main directions of underwater robotics [35].

Recent advances in the technology of underwater vehicles and acoustic communication have made the coordinated control of a group of AUVs possible, which may consist of functionally different vehicles (heterogeneous), which may differ in cruising speed and ranges of hydroacoustic (sonar) communication channels.

For example, in [115; 116], the ACS software system for robotic platforms MOOS (Mission Oriented Operating Suite), based on the «publish-subscribe»

Така САК була застосована для координації керування групою АНПА для рішення пошукових операцій. У вказаній роботі застосовано методологію «Iv Helm» (інтервальне програмування) для формулювання й розв'язку багатоцільових завдань оптимізації. Ця методологія є основним компонентом для формування модулів MOOS-I, які забезпечують автономність на роботизованих гетерогенних платформах [118].

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

Низку наукових робіт присвячено аналізу підходів до побудови САК на базі нечіткої логіки, оскільки цей метод забезпечує високий ступінь стійкості керування й стійкість роботи в умовах перешкод. Так, в [120; 121] було запропоновано моделювання нечітких контролерів з ковзним режимом для АНПА без використання системної моделі й представлені результати експерименту АНПА, використовуючи нечіткий закон керування з ковзним режимом.

В [122] автори використовують нечітку логіку й візуальні датчики для уникнення перешкод для колісного робота. Одна з головних переваг цього методу – високий ступінь стабільності й імунітету від зовнішніх збурень. У порівнянні з іншими методами керування нечіткий регулятор має найвищий ступінь свободи в установленні параметрів і використовує просте математичне забезпечення [123].

Крім переваг вказаних вище підходів до побудови систем керування та використаних моделей руху АНПА, вони мають ряд недоліків. Так, у ході виконання місії не розглядаються питання безаварійного руху окремого АНПА під час групової місії команди АНПА. Під час виконання місії АНПА можуть бути занадто близько один від одного, що може викликати проблеми для групи АНПА.

Крім того, існує ймовірність того, що окремі АНПА будуть переміщатися

architecture [117], is described. In this work, the Iv Helm (interval programming) methodology is applied to formulate and solve multipurpose optimization problems. This methodology is the main component for the formation of MOOS-I modules that provide autonomy on robotic heterogeneous platforms [118].

In [119], a model based on multiple sensor control for collision avoidance and tracking a given trajectory of a mobile robot is also proposed. These methods reduce time and energy consumption.

A number of scientific works are devoted to the analysis of approaches to the construction of a ACS based on fuzzy logic as this method provides a high degree of control stability and operation stability in the presence of interference. Thus, in [120; 121] the modeling of fuzzy controllers with sliding mode for AUV without the use of a system model was proposed and the results of the AUV experiment were presented, using the fuzzy control law with sliding mode.

In [122], the authors use fuzzy logic and visual sensors to avoid obstacles for a wheeled robot. One of the main advantages of this method is a high degree of stability and immunity from external disturbances. Compared to other control methods, the fuzzy controller has the highest degree of freedom in setting parameters and uses simple mathematical software [123].

In addition to the advantages of the above approaches to the construction of control systems and the AUV motion models used, they have a number of disadvantages.

Thus, in the course of the missions, the issues of accident-free motion of an individual AUV during the group mission of the AUV team are not considered. During the mission, the AUVs may be too close to each other, which can cause problems for the AUV team.

In addition, there is a possibility that the AUVs will move too far from the working areas of the AUV group and thereby lose

занадто далеко від заданих робочих зон групи АНПА й тим самим втрачать 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_{MASI} та T_{MASI} розгортання АНПА в групу та її групового переходу до робочої зони акваторії згідно (3.16) як типових етапів для організації групового руху [124].

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

Дамо опис його роботи у порядку нумерації блоків алгоритму.

В1 – 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 $v_3 = v_{MASI}$; $\varphi_3 = \varphi_{MASI}$; $h_3 = h_{MASI}$ – відповідно, задані швидкість лінійного руху, курс і глибина занурення АНПА при їх груповому русі;

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

В2 – умовний перехід X_I , який містить підготовчі операції САК веденим АНПА як «агентом» групи підводних апаратів:

contact with each other, which will adversely affect their underwater mission.

Therefore, the specified problems will be further considered and the fuzzy AUV ACS synthesis is performed for the coordinated motion of vehicles in the group transition, which ensures the safe mission implementation.

Attention will be paid to the integration of multisensory information from rangefinders to simulate the navigation environment around each AUV.

3.3.2. Development of a generalized ACS operation algorithm of a follower AUV as a group «agent» of the underwater vehicles. The plane motion of the follower AUV as a group «agent» during the execution of stages F_{MASI} and T_{MASI} of the AUV deployment into a group and its group transition to the water area working zone according to (3.16) as typical stages for group motion organization is considered [124].

The ACS generalized operation algorithm of the i -th follower AUV as a group «agent» of underwater vehicles, performs preparatory operations and, actually, the group transition, is shown in Fig. 3.6.

Let's give its operation in the numbering order of the algorithm blocks.

B1 – survey of the follower AUV-1 regarding the current stage of the basic robotic technology for automatic execution of search underwater missions; here the tasks on the GT and specified from the local control level B are also introduced:

– the values of the motion parameters $M_3 = \{v_3, \varphi_3, h_3\}$, where $v_3 = v_{MASI}$; $\theta_3 = \theta_{MASI}$; $h_3 = h_{MASI}$ – respectively, specified speed $\{v_3; \Lambda_3\}$ of linear motion, the course and immersion depth of the AUV during their group motion;

– the value of the follower AUV starting coordinates $\{\Phi_3; \Lambda_3\}$.

B2 – conditional transition X_I , which contains the ACS preparatory operations of the follower AUV as a group «agent» of the underwater vehicles:

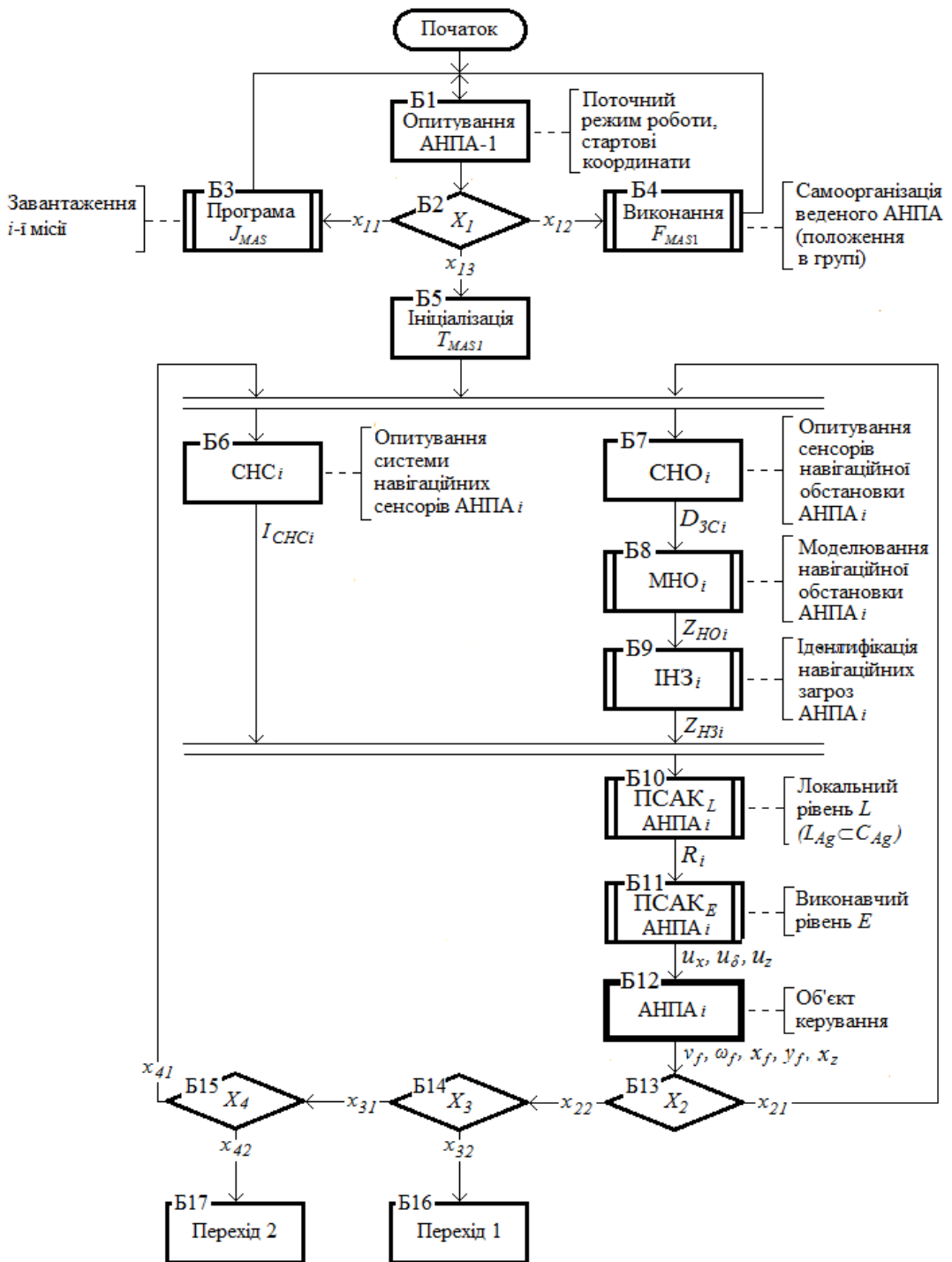


Рисунок 3.6. – Узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування i -м веденим АНПА в режимі групового переходу

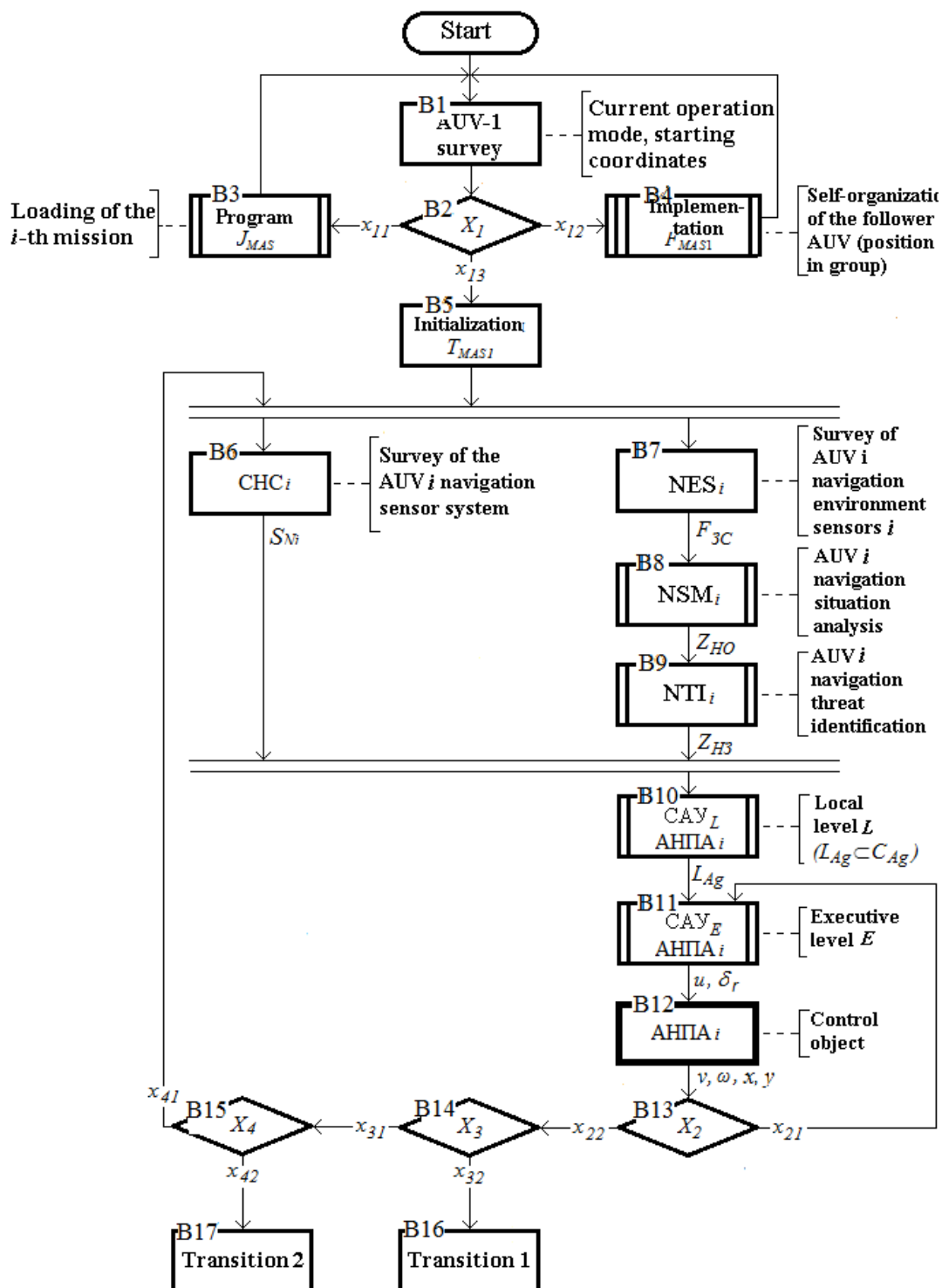


Figure 3.6. – The generalized operation algorithm of the automatic control system of i -th follower AUV in the group transition mode

x_{11} – перехід до блоку B3 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 B4 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 B5 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.

B6 – 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 .

B7 – 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.

B8 – блок аналізу та моделювання навігаційної обстановки (МНО) навколо i -го веденого АНПА; тут на основі інформації від B7 виділяються дистанції та пеленги (курсові кути) до найбільш небезпечних (найближчих) АНПА-сусідів, які створюють навігаційні загрози для i -го веденого АНПА; інформація Z_{HO} про

x_{11} – transition to block B3 of loading into the on-board process controller memory of the follower AUV execution program for the current search mission J_{MAS} according to (3.23), here the maritime radio communication channel and RHAB are involved (see section 2.4);

x_{12} – transition to block B4 of execution stage F_{MAS1} of self-organization of the released AUVs (automatic group formation) for the subsequent collective transition to the working area where the search underwater mission will be performed, execution stage F_{MAS1} provides for the installation of hydroacoustic communication with the neighboring AUVs, immersion to a given depth h_3 and turning the follower vehicle to a given course θ_3 ;

x_{13} – transition to block B5 for execution initialization of the current search mission of J_{MAS} where preparatory operations are performed with the help of the follower AUV process controller to ensure its trouble-free group motion – functionality test of the AUV navigation sensors and the navigation situation sensors around it.

B6 – survey block of the navigation system sensors (NSS) of the i -th follower AUV, which provide information to I_{NSSi} about the actual values of its linear v_i and angular ω_i and speeds of the AUV, the course θ_i and the depth of immersion h_i .

B7 – survey block of navigational environment sensors (NES) around the i -th follower AUV; here the information D_{EE} on AUV-neighbors in the group which move in parallel courses and can create navigational obstacles of the i -th follower AUV motion happens here; usually, it is the distance d_{ij} to the j -th AUV neighbor and bearing α_{ij} or the course angle KK_{ij} on this vehicle.

B8 – navigation situation model block (NSM) around the i -th follower AUV; here, on the basis of information from B7, distances and bearings to the most dangerous (closest) AUV-neighbors are allocated, which pose a threat of collision with the i -th follower AUV; Z_{NS} information about the selected

виділених АНПА-сусідів використовується для подальшої оцінки ступеню навігаційної небезпеки для i -го веденого АНПА.

Б9 – блок аналізу та ідентифікації навігаційних загроз (ІНЗ) для i -го веденого АНПА; тут визначаються статичні й динамічні характеристики руху АНПА-сусідів, на основі чого кількісно оцінюються можливі ризики зіткнень або втрати зв'язку з ними в результаті неприпустимого збільшення дистанції; тут також за результатами отриманих оцінок можливих загроз від АНПА-сусідів формуються рекомендації щодо нейтралізації кожної виявленої загрози шляхом маневрування i -го веденого АНПА; зазначена інформація $Z_{НЗ}$ слугує основою для обчислення керуючого впливу на i -й ведений АНПА з урахуванням групових загроз, які діють одночасно.

Б10 – блок має забезпечити локальний рівень L автоматичного керування рухом i -го веденого АНПА в умовах навігаційних загроз двох типів – навігаційної близькості сусідніх підводних апаратів групи та можливої втрати гідроакустичного зв'язку з сусідніми АНПА з-за неприпустимо великої дистанції до них (більшої, ніж радіус дії бортових систем зв'язку апаратів r_c); цей рівень забезпечується підсистемою ПСАК $_L$ (множина рекомендацій R_i щодо безпечного руху i -го веденого АНПА).

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

Б12 – об'єкт керування (i -й ведений АНПА), основними виходами якого є фактичні значення лінійної v_f і кутової ω_f

AUV-neighbors is used to further assess the degree of their navigational hazard for the i -th follower AUV.

Б9 – analysis (identification) and navigational threat identifier (NTI) block for the i -th follower AUV; here the motion static and dynamic parameters of the AUV-neighbors are determined, on the basis of which the collision risks with them or the communication loss with them as a result of the unacceptable increase in the distance to them are quantified; here, also based on the results of the received assessments of possible threats from AUV-neighbors, recommendations are formed to neutralize each identified threat by maneuvering the i -th follower AUV; the specified information of Z_{NT} serves as a basis for calculation of control influence on the i -th follower AUV taking into account the group threats operating simultaneously.

Б10 – the block (unit) must provide the local level L of motion automatic control of the i -th follower AUV in conditions of two types of navigation threats – the navigation proximity of the group's neighboring underwater vehicles and the possible loss of hydroacoustic communication with neighboring AUVs due to an unacceptably large distance to them (greater than the on-board communication systems radius r_c of the vehicles); this level is provided by the subsystem SACS $_L$ (a set of recommendations of R_i on safe movement of the i -th follower AUV).

Б11 – block must implement the executive level E of i -th follower AUV automatic motion control by maintaining the specified values of the course and speed of linear motion (subsystem SACS $_E$); the output signals of the block B11 are the control signals of the DC PEM speed u_x (speed control v_{xi}), the drive of the PSC stern of the of i -th follower AUV $u_{\delta i}$, which changes the steering angle δ_{Ri} , and the control signal u_{zi} of the AUV vertical motion of PEM in case of emergency depth change.

Б12 – control object (i -th follower AUV), whose the main outputs are the AUV linear

швидкостей АНПА та поточні координати його плоского руху (x_p, y_p) .

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_p , 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 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:

v_f and angular velocities ω_f and the current coordinates of its plane motion (x_f, y_f) .

B13 – conditional transition X_2 , which controls the continuation (condition x_{21}) or completion (condition x_{22}) completion of the safe divergence maneuver with the AUV-neighbor.

B14 – conditional transition X_3 , which controls the completion of the stage T_{MAS1} of the group transition based on the mission estimated duration and ensures the stage continuation (condition x_{31}) or a transition to block B16 (condition x_{32}) to perform the next stage of the mission.

B15 – conditional transition X_p which controls the power supply indicators of F_{MAS1} and T_{MAS1} stages (conditions x_{41} and x_{42}) in case of a decrease in energy indicators, energy sources of the i -th follower AUV (condition x_{42}), a transition to block B17 (condition x_{42}) is performed for early mission completion by this underwater vehicle.

The proposed generalized automatic control system functioning algorithm of the i -th follower AUV in the group transition mode reproduces the main tasks for the AUV group automatic control system and, thus, forms a methodological basis for the development of individual most complex components of such ACS.

3.3.3. Development of the automatic control system structure of a follower AUV as a group «agent». Analysis of AUV group control tasks in indicated stages of the sea mission shows that one of the key tasks is to ensure safe (accident-free) movement of an individual follower AUV in a group at a given depth $h_3 = h_{MAS}$ with a given course $\theta_3 = \theta_{MAS}$ and at a given speed $v_3 = v_{MAS}$.

The theoretical basis for the automation of such A_{MUC} motion is the concept of alignment A_{GU} , adhesion A_{GA} and cohesion A_{GC} [125].

The concept of *alignment* implies keeping stable the above three parameters of the AUV group automatic movement:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Кількість сенсорів і їхні діаграми направленості залежать від низки вимог до

which requires the AUV group motion in a given direction or along a given spatial trajectory and automatic motion control of a single AUV as a group agent in a given direction with a recommended given speed and at a given depth, which is the same for all the group AUVs.

The concept of *adhesion* implies for the task of each AUV, as a group agent, to move taking into account the A_{GU} and simultaneous control of the minimum possible distance between an individual agent and its neighbors, safe from the from the collision positions:

where x_i – the distance from the i -th follower AUV to the neighboring AUV along the course (heading) angle KK_i ; x_{min} – the minimum possible safe distance to the neighboring AUV; W – the number of directions (course angles) controlled by the corresponding navigation rangefinders of the i -th follower AUV.

The concept of *cohesion* implies the task of each group agent to move, taking into account the A_{GU} and simultaneous control of the maximum possible distance between the i -th follower AUV and its neighbors, safe from the standpoint of sensory contact loss (for example, hydroacoustic communication) and, as a consequence, the AUV group loss as a result of its «dispersal»:

where x_{max} – the maximum allowable distance between the i -th follower AUV and the neighboring AUV, which maintains a reliable sensory contact between them.

Underwater hydroacoustic, laser or electric sensors can be used as AUV rangefinders, which should provide the underwater vehicle automatic control system with sensitivity to neighboring AUVs moving in a group [126; 127].

The number of sensors and their directional diagrams depend on a number of requirements in the AUV group motion and

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 напрямків 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

on the peculiarities of the underwater search mission. Typically, the number of sensors varies from 4 to 12 and provides measurement of distances between AUVs at the appropriate course angles in the range of 0.1 m to 20 m, which makes it possible to build effective control systems for group movement of underwater robotics.

Obviously, when the general requirement (3.18) is fulfilled, in order to avoid collisions with neighboring AUVs, the i -th follower underwater vehicle has two main types of maneuvers – course maneuver and a motion speed maneuver.

The depth maneuver will be considered as emergency, undesirable from the standpoint of the mission being performed.

To assess the degree of threat of collisions between the agents of the AUV group, it is proposed, in accordance with clause 3.3.2, to introduce special blocks into the ACS of the i -th follower AUV: block «Navigation situation model» (NSM) around the corresponding AUV; block «Navigational threat identifier» (NTI) for this i -th AUV.

It is expedient to construct these specified blocks with the theory of fuzzy logic involvement [82]. This is due to the properties of the i -th follower AUV as a control object, which is characterized by information insufficiency and uncertainty, which complicate the application of classical analytical methods of regulator synthesis.

Let's consider the purpose of these blocks in more detail.

The main task of the NSM functioning for the i -th follower AUV is to form the current underwater navigation situation for it – identifying the K closest AUV-neighbors, which form a threat of collision and M of the AUV-neighbors themselves, which form the threat of losing contact with the W directions controlled by the rangefinders, and also determining the distance to them.

The purpose of the NTI block is to determine the motion static and dynamic parameters of each of the identified

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 дана на рис. 3.7 (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 ЧО 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.

AUV-neighbors in W directions, to quantitatively calculate the level of collision threat or contact loss with it (characteristics of its AUV adhesion and cohesion in relation to the nearest AUV-neighbors) and, at the same time, the formation recommendations for neutralizing the detected threat by maneuvering the course, speed and, in case of extreme necessity, the immersion (dive) depth.

The generalized structure of the ACS of a single AUV as a group agent is shown in Fig. 3.7 (for convenience, the index «i» is omitted).

Let us consider the basic principles of the above ACS functioning, based on the generalized ACS functioning algorithm (p. 3.3.2).

The navigation situation sensors (NSS) block of the i-th follower AUV (block B7 in Fig. 3.6) contains a set of W group motion sensors (sensors of controlled directions for measuring distances to targets that appear in their measurement sectors).

At the NSS block output, sets of signals about the distance to the neighboring AUVs of the group are formed (in increasing order – from the smallest to the largest) $D_{EE} = \{D_{EE1}, \dots, D_{EEw}, \dots, D_{EEw}\}$ and bearings A_{3C} or heading angles of KK_{EE} on them.

It is obvious that each element of the set of signals D_{EEw} can contain several distances d_{wi} if there are several AUV-neighbors in the measurement sector of the w-th sensor.

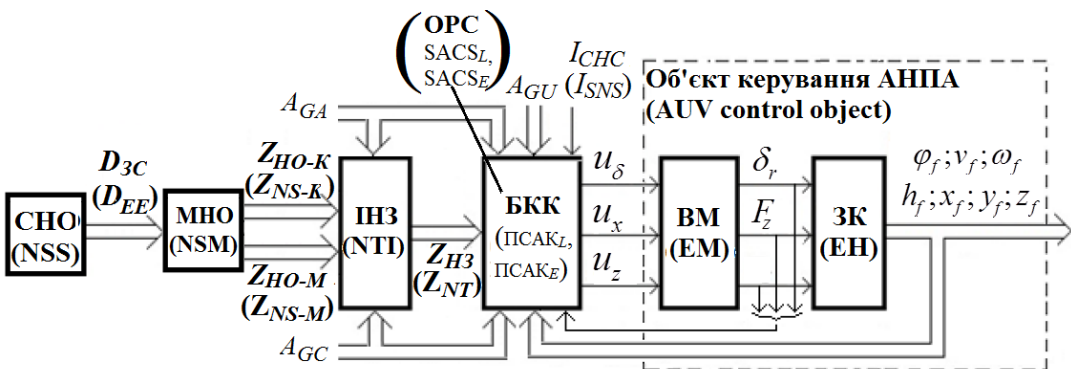


Рисунок 3.7 – Структура САК одиночним АНПА як агентом групи

Figure 3.7 – The structure of a single AUV ACS as a group agent

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:

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

Блок «Модель навігаційної обстановки» (блок Б8 на рис. 3.8) на основі сигналів D_{3Ci} формує поточну статичну та динамічну характеристики цілей (АНПА-сусідів) навколо свого АНПА, визначає K найближчих АНПА-сусідів, які утворюють найбільшу загрозу зіткнення для нього та визначає M найвіддаленіших від нього АНПА-сусідів, що утворюють загрозу неприпустимо великої відстані від нього і втрати гідроакустичного зв'язку (відповідно, вихідні змінні Z_{HO-Ki} і Z_{HO-Mi}) [129].

У блоці МНО виконуються наступні операції:

- визначаються мінімальні D_{HO-Ki} та максимальні D_{HO-Mi} дистанції до виявлених АНПА-сусідів та визначаються пеленги на них (A_{HO-Ki} , A_{HO-Mi}) та/чи курсові кути (KK_{HO-Mi} , KK_{HO-Ki});

- за допомогою обчислювача похідних (ОП) визначаються динамічні характеристики руху виявлених АНПА-сусідів по груповому руху – лінійні швидкості руху KK_{HO-Ki} , з якими вони змінюють дистанцію до i -го веденого АНПА та лінійні швидкості руху KK_{HO-Mi} , з якими вони змінюють дистанцію до нього з контрольованих напрямків, що визначаються W сенсорами СНО.

The course (heading) angles KK_w (bearings α_w) for such AUVs will be the same and are determined by the location of the corresponding sensor on the AUV hull in the body-fixed coordinates (reference system) [128].

Then the D_{EE} set can be represented by a matrix of the same name distances matrix D_{EEi} from the i -th follower AUV to the neighboring AUVs, having the size $[W \times N]$, where W – the number of sensors (controlled directions) of the i -th follower AUV navigational environment (situation); N – the number of AUVs in the group:

Navigation situation model block (NSM block B8 in Fig. 3.8), based on D_{EEi} signals, forms the current static and dynamic characteristics of targets (AUV-neighbors) around its AUV, determines K nearest AUV-neighbors, which form the greatest threat of collision for it and determines M most distant from its AUVs-neighbors, which pose a threat of unacceptably long distance from it and the loss of sonar (respectively, the output variables Z_{NS-Ki} and Z_{NS-Mi}).

The following operations are performed in the NSM block:

- the minimum D_{NS-Ki} and maximum D_{NS-Mi} distances to the detected AUV-neighbors are determined and their bearings (A_{NS-Ki} , A_{NS-Mi}) and/or heading angles (KK_{NS-Mi} , KK_{NS-Ki}) are determined;

- using the derivative calculator (DC), the motion dynamic characteristics of the identified neighbor – AUVs by the group motion are determined – the linear velocities KK_{HO-Ki} , with which they change the distance to the i -th follower AUV and the linear velocities KK_{NS-Mi} , with which they change the distance to it from controlled directions, determined by W CHO sensors.

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

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

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

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

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

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-K_i} та швидкостей їх зближення чи віддалення V_{HO-K_i} :

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

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

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

As a result, two sets of parameters that characterize the navigation environment around the i -th follower AUV are formed:

where $K \leq W$ і $K \leq N$.

For convenience of further use in the i -th follower AUV ACS synthesis, the obtained sets of parameters should be represented by two pairs of matrices with the sizes $[W \times K]$ and $[W \times M]$, in which the static and dynamic characteristics of the AUV-neighbors associated with the sensors of the controlled directions of the AUV block (as a rule, by heading angles, since the sensors of the i -th follower AUV are fixed on its EH (outer hull) and are tied to the associated body-fixed coordinates (reference) system, namely:

– two matrices of distances to the nearest AUV-neighbors D_{NS-K_i} and speeds of their approach or distance V_{NS-K_i} :

– with two matrices of distances, to the most distant neighbor-AUVs D_{NS-M_i} and their distance change speeds to them V_{NS-M_i} :

$$D_{HO-M_i}(D_{NS-M_i}) = c \quad (3.26)$$

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

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 B9 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 апа-

Note that the information of D_{NS-Ki} and V_{NS-Ki} is necessary for the implementation, in fact, the adhesion and cohesion modes, and the information of D_{NS-Mi} and V_{NS-Mi} – for the implementation of more complex group control algorithms, for example, when the i -th follower AUV takes on itself the group leader-AUV functions.

Thus, the matrix elements $D_{NS-Ki} \subset Z_{NSi}$, $D_{NS-Mi} \subset Z_{NSi}$, $V_{NS-Ki} \subset Z_{NSi}$ and $V_{NS-Mi} \subset Z_{NSi}$ contain information about the distance to K and M navigationally dangerous neighboring AUVs and their change rate in W directions (in most cases, along angles KK_{EE-Ki} and KK_{EE-Mi}) of the i -th follower AUV, which are controlled by its corresponding sensors CHO_i .

These matrices form the information basis for quantitative assessment of navigation threats around the i -th follower AUV.

The navigation threats identification block (block B9 in Fig. 3.6) assesses the degree of collision threat with the AUV-neighbors and/or the sonar contact loss threat with them in the case of flat horizontal motion according to dependences (3.19) and (3.20) taking into account the dynamics of group motion with $k \in K$ detected by the nearest AUV neighbors and with $m \in M$ detected by the most distant neighbor-AUVs along the $w \in W$ controlled directions.

It is obvious that for the safe motion organization of the i -th follower AUV in the group, it is sufficient to take into account the navigation threats from only one nearest and, therefore, the most dangerous, AUV-neighbor from each controlled direction $w \in W$. This is explained by the fact that in the controlled direction of several AUV-neighbors, the greatest collision threat (or contact loss with the group) is posed by the nearest AUV-neighbor.

At the same time, the hydroacoustic communication with it guarantees the i -th follower AUV communication with the group as a whole and, therefore, its preservation as an «agent» in the group. In this case, if the most distant AUV-neighbor of the M detected underwater vehicle tends to increase the

ратів 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 і його втратою як «агента» групи.

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

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

$$D_{H3-M_i} = D_{NT-M_i} = \begin{bmatrix} d_{1M_i} \\ \dots \\ d_{wM_i} \\ \dots \\ d_{MK_i} \end{bmatrix}; \quad V_{NT-M_i} = \begin{bmatrix} v_{1M_i} \\ \dots \\ v_{wM_i} \\ \dots \\ v_{WM_i} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

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.

distance with the i -th follower AUV with the hydroacoustic communication loss threat with it, this will not lead to the group «dispersion/scattering», since such communication will be supported by AUVs, which are located between these two vehicles.

However, if no collision-threatening AUV-neighbors are detected from the w -th direction, the actual task of controlling the distance to the nearest AUV-neighbor, which is moving away from the i -th follower AUV, is relevant. This is due to the threat of loss of the i -th follower AUV communication with the group and its loss as a group «agent».

Therefore, each of the sets Z_{NS-K_i} and Z_{NS-M_i} in the format (3.22) and (3.23) must be represented by two matrices-columns of navigation threats of size $[W \times 1]$ each, containing information, respectively, about the distances d_{wi} between the i -th follower AUV and the nearest AUV-neighbor identified in each of the $w \in W$ controlled directions, as well as the rate v_{wi} of changes of these distances to them during the i -th follower AUV motion in the group:

where K_1, M_1 – indices characterizing the assignment of variables, respectively, to the minimum and maximum distances to the AUVs-neighbors.

At the same time, a recommendations set P_{NTi} for neutralizing each separate (single acting) w -th detected threat is formed in the NTI block.

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:

$$P_{H3i} = (P_{NTi}) = \begin{bmatrix} P_{H3i} \\ \dots \\ P_{H3wi} \\ \dots \\ P_{H3wi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{NTi} \\ \dots \\ P_{NTwi} \\ \dots \\ P_{NTwi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\phi_{li} & \dots & \Delta v_{li} & \dots & \Delta h_{li} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\phi_{wi} & \dots & \Delta v_{wi} & \dots & \Delta h_{wi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\phi_{wi} & \dots & \Delta v_{wi} & \dots & \Delta h_{wi} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

де $p_{H3wi} = \{\Delta\phi_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ – 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:

$$Z_{H3i} = \{D_{H3-K1P} \cdot V_{H3-K1P} \cdot P_{H3i}\}. \quad (3.31)$$

$$(Z_{NTi} = \{D_{NT-K1P} \cdot V_{NT-K1P} \cdot P_{NTi}\}). \quad (3.31)$$

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

Obviously, such neutralization can be realized by maneuvering the course θ_i , speed v_i and, in case of emergency, by changing the immersion depth h_i of the i -th follower AUV.

It is advisable to represent the recommendations set P_{NTi} by an eponymous matrix of size $[W \times 3]$, whose elements contain the recommended control reactions of the i -th follower AUV to each w -th detected threat under the assumption that it is the only current threat to the i -th follower AUV at that time:

where $p_{NTwi} = \{\Delta\theta_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ – respectively, the recommended course, linear velocity and motion depth of the i -th follower AUV to neutralize the w -th identified threat.

Thus, information about each identified navigation threat from the w -th direction ($w \in W$) for the i -th follower AUV at the output of the block NTI (see Fig. 3.7) can be represented by the following matrices:

$$Z_{H3i} = \{D_{H3-K1P} \cdot V_{H3-K1P} \cdot P_{H3i}\}. \quad (3.31)$$

$$(Z_{NTi} = \{D_{NT-K1P} \cdot V_{NT-K1P} \cdot P_{NTi}\}). \quad (3.31)$$

The obtained resulting matrices can be used as basic solutions for the i -th AUV safe motion organization, provided that its NSS has detected only one navigationally dangerous AUV-neighbor (P_{NTi} matrix) and to calculate the i -th AUV maneuver, when navigationally dangerous AUV-neighbors are detected simultaneously from several directions.

The onboard process controller (OPC) of the i -th follower AUV ACS performs a threefold task for the local L and executive E control levels:

– for the local level L of group control of underwater vehicles (SACS_{Li}) – based on the

(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 ІЗ 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 такі 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 $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ для виконання

matrices $Z_{NTi} = \{D_{NT-Ki}; V_{NT-Ki}; P_{NTi}\}$, calculated according to the dependences (3.28) – (3.30), forms the control solution R_i for the actual maneuvering of the i -th follower AUV to avoid the identified single or group threats $w \in W$ in the NTI:

– for the executive level E of group control of underwater vehicles (SACS_{Ei}) – generates control actions $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ on the EM of the i -th follower AUV – respectively, the PSC steering gear (rudder drive) (controlled value – rudder shift angle δ_r), matching propulsive (driving) device (controlled value – PEM angular rotation frequency ω_x or thrust along the longitudinal axis F_x) and, in emergency cases, vertical propulsive device (controlled value – the PEM angular frequency of rotation ω_z or the i -th AUV PSC thrust along the vertical axis F_z) in order to implement *adhesion* A_{GA} and *cohesion* A_{GC} modes according to (3.19) and (3.20);

– for the executive level E of the group control of underwater vehicles (ПСАК_{Ei}) – generates control actions $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ to the executive mechanism (EM) of the i -th follower AUV – respectively, to the PSC rudder drive (the controlled value is the rudder shift angle δ_r), the main propulsion device (the controlled value – PEM angular rotation frequency ω_x or thrust along the longitudinal axis F_x) and vertical driving device (controlled value – PEM angular rotation frequency ω_x or thrust along the longitudinal axis F_x) in order to implement the «*alignment*» mode A_{GU} of the i -th follower AUV, that is, the content of the motion parameters set to it according to (3.18) with using information I_{SNSi} from block Б6 (Fig. 3.6).

Thus, in the ACS OPC block of the i -th follower AUV as a group «agent» (Fig. 3.7) the following control actions are defined:

– at the local level L of group control (block Б10 in Fig. 3.6) the recommendation $R_i \in L_{Ag}$ for its safe motion in the group is formed;

– at the executive level, the control actions $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ are calculated to fulfill

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 – $\{\varphi_j; \nu_j; \omega_j; h_j; x_j; y_j\}$, 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:

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

the conditions (3.18) – (3.20) of the controlled motion of the i -th follower AUV as a group «agent» – compliance with the alignment, adhesion and cohesion modes.

The aforementioned control actions applied to the AUV EH cause the appearance of the actual spatial motion variables of the i -th follower AUV – $\{\theta_j; \nu_j; \omega_j; h_j; x_j; y_j\}$, which are used as feedback signal in its ACS OPC.

The synthesis principles of the main blocks of such ACS will be considered below.

3.3.4. Development of the «Navigational Threat Identifier» block. The input data for the NTI block operation are the matrices $D_{NS-Ki} \subset Z_{NSi}$ and $V_{NS-Ki} \subset Z_{NSi}$ according to (3.24) and (3.26), which contain information about the distances to K navigationally hazardous neighboring AUVs and the rate of their change in W directions.

As mentioned above, the following navigation information transformations are performed in the i -th follower AUV NTI block:

– by analyzing the D_{NS-Ki} matrix, the nearest AUV-neighbor in each of the W directions is determined, which forms the greatest collision threat with the i -th follower AUV in this direction:

– by analyzing the matrix D_{NS-Mi} , the most distant AUV-neighbor for the i -th follower AUV is determined, which forms a threat of an unacceptably large distance from it and the associated loss threat of the hydroacoustic communication between them:

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

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

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

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

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

– для дистанцій d_{wKi} та d_{wMi} :

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

D_C – дистанція середня;

D_{Opt} – дистанція оптимальна (бажана);

D_M – дистанція мала;

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

– для швидкостей v_{wKi} та v_{wMi} :

V_{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.

Зазначені правила мають реалізувати режими адгезії і когезії згідно (3.19), (3.20).

For the selected distances d_{wKi} and d_{wMi} their first derivatives are calculated, i.e. the rates of change of distances v_{wKi} and v_{wMi} to them.

Thus, by means of dependences (3.33) and (3.34) pairs of matrices D_{NT-Ki} , V_{NT-Ki} and D_{NT-Mi} , V_{NT-Mi} according to (3.28) and (3.29) are obtained.

Let us now consider the peculiarities of calculating the recommendation matrix P_{NTi} according to (3.30).

Consider the case when the NSS block of the i -th follower AUV finds only one navigation-dangerous neighbor-AUV.

As noted above, it is expedient to construct the NTI block as a whole and to calculate the recommendation matrix P_{NTi} in particular, using the fuzzy logic theory [130]. In this case, the fuzzification of input variables (3.28)-(3.29) for each pair $\{d_{wKi}; v_{wKi}\}$ and $\{d_{wMi}; v_{wMi}\}$ in the NTI block can be performed by introducing the following linguistic variables:

– for distances d_{wKi} and d_{wMi} :

D_L – long (large) distance (threat of loss of communication with the AUV-neighbor)

D_A – average distance;

D_{Opt} – the distance is optimal (desirable);

D_S – distance is small;

D_{LR} – the distance is low risk (collision threat with the AUV-neighbor)

– for speeds v_{wKi} and v_{wMi} :

V_{HA} – high approach speed;

V_{AA} – average approach speed;

V_{LA} – low approach speed;

V_0 – zero approach speed (desirable);

V_{LR} – low recession speed;

V_{AR} – average recession speed;

V_{HR} – high recession speed.

Membership functions of distances and characteristics of these changes can be fully represented in the form of tricky functions (trimf), Fig. 3.8.

The specified rules must (need) implement the adhesion and cohesion modes according to (3.19), (3.20).

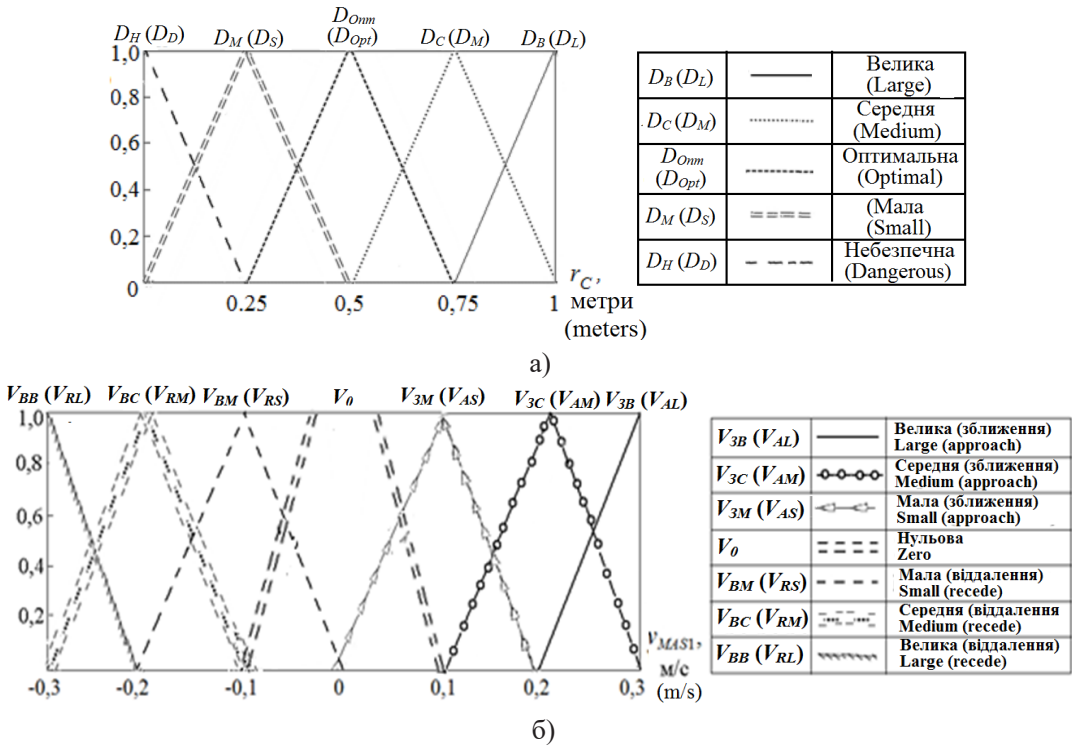


Рисунок 3.8 – Функції приналежності:
а – вхідна змінна «дистанція до АНПА-сусіда», метри;
б – вхідна змінна швидкість зближення/віддалення, м/с

Figure 3.8 – Membership functions:
a – input variable "distance to AUV-neighbor", meters;
b – input variable speed of approach/recession, m/s

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

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

The previous rule-based synthesis experiences for the i -th follower AUV EM reaction to threats from different controlled (monitored) directions show that in the presence of only one detected threat, its EM recommended reactions have the same work logic and, consequently, the same structure of the received recommendations. This is due to the fact that, regardless of the angle of bearing to the threat, the i -th follower AUV must evade it with the course or speed maneuver, and if such a maneuver is impossible, perform the course and speed maneuver simultaneously, or temporarily change the immersion (diving) depth.

The synthesis task of the entire set of such maneuvers belongs to the design work in the engineering design of regulators.

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

Розглянемо структуру бази правил для випадку, коли сусідній АНПА виявлено правим бортовим сенсором i -го веденого АНПА, що контролює загрози по поперечній осі y зв'язаної системи координат АНПА (матриця рекомендацій P_{H3wi-y} , база правил BP_{Pn3-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;

$\Delta\theta_{wiB(m,c,\theta)}$ – 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 тимча-

As an example, consider the i -th follower AUV, which has four sensors ($W=4$) of the navigation situation, one – on the AUV nose, the second – on the stern, the third and fourth – on the left and right sides [130] (see Fig. 3.9).

Let us consider the structure of the rule base for the case when a neighboring AUV is detected by the right onboard sensor of the i -th follower AUV, which controls (monitors) threats along the transverse y -axis of the AUV body-fixed reference system (recommendations matrix R_{NTwi-y} , rule base RB_{Rrb-y}).

For the writing convenience, we will write the components of each element $R_{NTwi} = \{\Delta\theta_{wi}, \Delta v_{wi}, \Delta h_{wi}\}$ of the matrix R_{NTwi} in the column form (see Table 3.2).

In Table 3.1 highlighted:

$\Delta\theta_{wiM(m,c,\theta)}$ – recommendations on the PSC rudder shift angle δ_r of the i -th follower AUV to reduce the distance to the detected single threat from the w -th direction (cohesion mode), respectively, m – small shift angle, c – average shift angle, θ – large shift angle;

$\Delta\theta_{wiB(m,c,\theta)}$ – recommendations on the PSC rudder shift angle δ_r of the i -th follower AUV to increase the distance to the detected single threat from the w -th direction (adhesion mode); the index values are similar to those described above);

Δh_{wi} – the i -th follower AUV immersion depth change recommendation; here and further we consider that such maneuver has

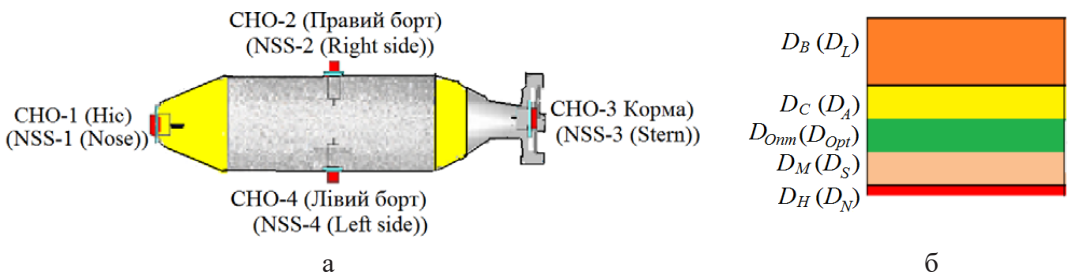


Рисунок 3.9 – Розташування сенсорів навігаційного зв'язку на ЗК i -го веденого АНПА (а) та градація дистанцій до АНПА-сусідів

Figure 3.9 – Location of navigation communication sensors on the i -th follower AUV EH (a) and the gradation of distances to the AUV-neighbors

совий 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 одиночної загрози по осі x зв'язаної системи координат.

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

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

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

temporary character and after some certain time this AUV returns to the predetermined depth $h_3 = h_{MAS1}$ and resumes the navigation situation analysis.

The rule bases for maneuvering the speed Δv_{wi} when a single threat is detected along the x -axis of the body-fixed reference system have a similar form. Moreover, in Table 3.2 instead of the recommendation $\Delta\theta_{wi}$ for changing the PSC rudder shift (steering) angle, there should be a recommendation Δv_{wi} for the i -th follower AUV linear motion velocity change.

Defuzzification of the variable $\Delta\theta_{wi}$ (recommendations for neutralization of a separate w -th detected threat) is written in the form of the membership function $\theta_{wi} = f(\Delta\theta_{wi})$, presented in Fig. 3.10.

As a result, at the output of the NTI block, simultaneously with the D_{NT-K} ; and V_{NT-Ki} , the matrix R_{NTi} like in (3.30) is formed, which contains recommendations for the i -th follower AUV maneuvers to avoid single navigational threats along the W controlled directions.

Таблиця 3.2 База правил RB_{Rrb-Y} блоку ІНЗ (правий бортовий сенсор)
Table 3.2. Rule base RB_{Rrb-y} of the NTI block (right onboard sensor)

		Швидкість зближення/віддалення V_{H3} The speed of approach/recession V_{NT}						
		V_{AB}^{3B} V_{AM}^{3B}	V_{AM}^{3B} V_{AS}^{3B}	V_0	V_{BM}^{3B} V_{BS}^{3B}	V_{BC}^{3B} V_{RM}^{3B}	V_{BB}^{3B} V_{RI}^{3B}	
Дистанція D_{H3}	D_B	0 0 0	0 0 0	0 0 0	$\Delta\theta_{wiMc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMs}$ 0 0
	D_C	$\Delta\theta_{wiBc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBm}$ 0 0	0 0 0	$\Delta\theta_{wiMm}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMs}$ 0 0
	D_{Onm}	$\Delta\theta_{wiBs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBm}$ 0 0	0 0 0	$\Delta\theta_{wiMm}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiMs}$ 0 0
	D_M	$\Delta\theta_{wiBs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBm}$ 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
	D_H	0 0 Δh_{wi}	0 0 Δh_{wi}	$\Delta\theta_{wiBs}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBc}$ 0 0	$\Delta\theta_{wiBm}$ 0 0	0 0 0	0 0 0

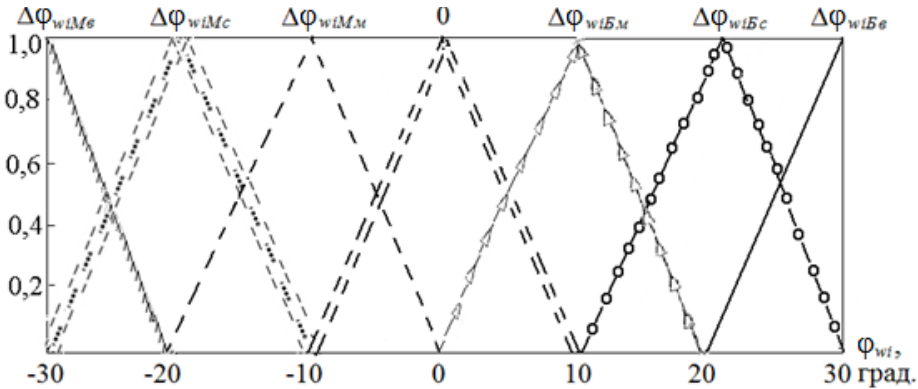


Рисунок 3.10 – Функція приналежності: вихідна змінна – кут перекладки стерна θ_{wi}
 Figure 3.10 – Membership function: output variable – rudder shift angle θ_{wi}

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

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

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

– *Задача-1:* формування керуючого рішення R_i для реального маневрування i -го веденого АНПА з метою уникнення зустрічі з одиночною R_1 чи груповою R_w загрозою та, одночасно, з метою зберегти себе у складі групи, не втративши зв'язок з найближчим АНПА-сусідом (локальний рівень L групового керування, підсистема ПСАК $_L$);

– *Задача-2:* формування керуючих впливів на виконавчі механізми (ВМ) i -го веденого АНПА з метою реалізації його безпечного руху у складі групи АНПА з дотриманням вимог режимів адгезії A_{GA} та когезії A_{GC} (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$);

– *Задача-3:* формування керуючих впливів на ВМ i -го веденого АНПА з метою реалізації режиму A_{GU} «вирівнювання» i -го

Thus, the measures L_{Ag} of the local level of automation L in the direction of automation C_{Ag} are implemented to ensure the i -th follower AUV spatial motion navigational safety within the group according to p.r. 1.5.

The implementation of many recommendations is assigned to the i -th follower AUV ACS on-board process controller (OPC) (Fig. 3.7).

3.3.5. Development of the «Onboard process controller» block. According to the purpose (see paragraph 3.3.3), the OPC block solves three main tasks:

– *Task-1:* formation of a control solution R_i for real maneuvering of the i -th follower AUV in order to avoid encountering with a single R_1 or group R_w threat and, at the same time, in order to keep oneself in the group without losing contact with the nearest neighbor-AUV (group control local level L , subsystem SACS $_L$);

– *Task-2:* the formation of control actions on the i -th follower AUV executive mechanisms (EM) in order to implement its safe movement within the AUV group in compliance with the requirements of the *adhesion* A_{GA} and *cohesion* A_{GC} modes (group control executive level E , the subsystem SACS $_E$);

– *Task-3:* the formation of control actions on the i -th follower AUV EM in order to implement the i -th follower AUV «alignment»

веденого АНПА, тобто утримання заданих йому параметрів руху як «агенту» групи АНПА (виконавчий рівень E групового керування, підсистема ПСАК $_E$).

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

Розглянемо призначення модулів блоку БКК.

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

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

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

$$W_T = \begin{cases} 0, & \text{if } D_{NT-Ki} = 0 \text{ (zero matrix } D_{NT-Ki}) \\ 1, & \text{if a single threat is detected;} \\ > 1, & \text{if more than one threat is detected} \end{cases}$$

A_{GU} mode, that is, the content of the motion parameters assigned to it as an AUV group «agent» (group control executive level E , subsystem SACS $_E$).

The OPC block structure, which ensures the performance of these functions is shown in Fig. 3.11.

Consider the purpose of the OPC block modules.

The “Threat Level Analysis” (TLA) module determines the number of controlled directions along which there are simultaneously navigational threats for the i -th follower AUV from the nearest AUV-neighbors.

Here, based on the analysis of the matrix $D_{NT-Ki} \subset Z_{NTi}$ (3.28) by sorting [132], the number of its nonzero elements $W_{T \leq W}$ is calculated by the expression:

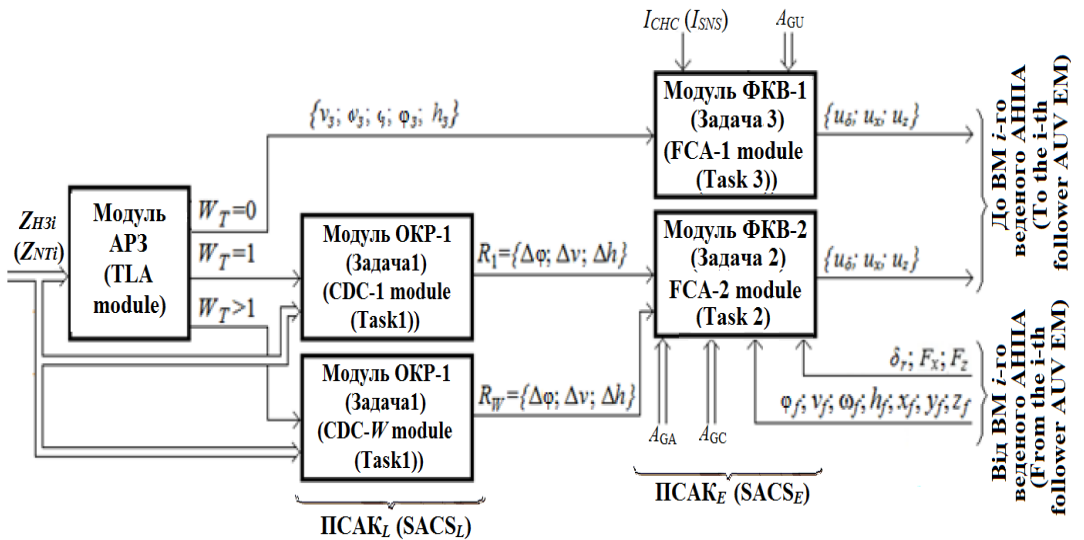


Рисунок 3.11 – Структура блоку «Бортовий керуючий контролер»
 Figure 3.11 – The block structure of the "Onboard process controller"

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 $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ 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 $R_i = \{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_i\}$ для конкретної навігаційної ситуації з одним АНПА-сусідом. Керуючі впливи $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ для ВМ 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 введено модуль «Обчислення

If $W_T=0$, this means that i -th follower AUV navigational threats are not detected and its ACS performs Task-3 «alignment» according to (3.18), that is, it generates requirements for the AUV EM to maintain three automatic group motion stable parameters: $v_g = v_{MAS1}$; $\theta_g = \theta_{MAS1}$; $h_g = h_{MAS1}$. In this case, the i -th follower AUV control is performed according to paragraph 2.3.7, and the control actions $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ for the i -th follower AUV EM are calculated in the «Formation of control actions-1» (FCA-1) module, where task-3 of the formation of control actions for the implementation of the i -th follower AUV «alignment» A_{GU} mode is solved (see Fig. 3.11). In this figure, the indices i at output variable modules are omitted for convenience of information perception.

Thus, the FCA-1 module implements one of the tasks of the group control executive level E (group control executive level E , subsystem SACS $_E$ in Fig. 3.6, block B11).

If $W_T=1$, it means that a single navigation threat has been detected, and its neutralization should be performed using the recommendations matrix R_{NTi} (3.30). For this purpose, the *Control decision computation (CDC-1) module* is introduced into the OPC structure, where using the recommendation matrix $R_{NTi} \subset Z_{NTi}$ determines the control solution $R_i = \{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_i\}$ for a specific navigational situation with one AUV-neighbor. Control actions $\{u_{\delta i}; u_{x i}; u_{z i}\}$ for the i -th follower AUV EM are calculated in the «Formation of control actions-2» (FCA-2) module where the task-2 of implementing its safe motion within the AUV group in compliance with the requirements of of *adhesion* A_{GA} and *cohesion* A_{GC} modes (group control executive level E , subsystem SACS $_E$ in Fig. 3.6, block B11) is solved.

The most difficult case is when $W_T > 1$. This means that the control solution $R_i = \{\Delta\theta_i; \Delta v_i; \Delta h_i\}$ in accordance with (3.32) should be searched for each combination of threats separately. To calculate such decisions, the OPC block introduced the «Computation of control decisions» module (CDC- W), whose

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 - ($CHO_N + CHO_P$); ($CHO_N + CHO_L$); ($CHO_N + CHO_K$); ($CHO_K + CHO_P$); ($CHO_K + CHO_L$); ($CHO_P + CHO_L$);
- три одночасно виявлені загрози + ($CHO_N + CHO_P + CHO_L$); ($CHO_K + CHO_P + CHO_L$); ($CHO_N + CHO_P + CHO_K$); ($CHO_N + CHO_L + CHO_K$);
- 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_{N3-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

content is determined by the number of NSS_i (the number of controlled areas W) and the i -th follower AUV.

Control actions $\{u_{\delta i}; u_{xi}; u_{zi}\}$ for the i -th follower AUV EM are also calculated in the FCA-2 module (executive level E of group control, subsystem SACS $_E$ in Fig. 3.6, block B11).

Thus, with $W=4$ (see Fig. 3.9) the possible navigation threat combination number is 11 and is determined by the number of paired, triple and one quadruple combination of threats detected by the NSS_i sensors. If the nose, right, left and tail sensors for the i -th follower AUV are marked, respectively, as NSS_N , NSS_R , NSS_L and NSS_T , we obtain the following combinations of possible navigation threats:

- two threats identified simultaneously - ($NSS_N + NSS_R$); ($NSS_N + NSS_L$); ($NSS_N + NSS_T$); ($NSS_T + NSS_R$); ($NSS_T + NSS_L$); ($NSS_R + NSS_L$);
- three threats identified simultaneously + ($NSS_N + NSS_R + NSS_L$); ($NSS_T + NSS_R + NSS_L$); ($NSS_N + NSS_R + NSS_T$); ($NSS_N + NSS_L + NSS_T$);
- four threats identified simultaneously - ($NSS_N + NSS_R + NSS_L + NSS_T$).

Further in the section we will consider the i -th follower AUV with $W=4$.

It is obvious that for each of the given possible combinations of navigational threats, determined by the matrix D_{NT-K1i} (for $W_T > 1$), it is necessary to synthesize a fuzzy controller similar to that described in section 3.3.4.

Let us consider the synthesis features of such regulator for each type of threat combination.

In the presence of two simultaneously detected threats of the type, ($NSS_N + NSS_R$), which act along different axes of the body-fixed reference system, the simultaneous application of two recommendations of the type (3.30) is permissible, since they cause maneuvers in different directions of the i -th follower AUV motion.

When two threats acting on the same axes are detected (for example, threats

($\text{CHO}_\Pi + \text{CHO}_\Delta$) діють по поперечній осі y), блок ОКР визначає найближчу по дистанції до загрозу i -го веденого АНПА і реалізує керування згідно до рекомендацій (3.30). Якщо дистанції до цих загроз однакові, виконується маневр швидкістю ($\Delta v_{wi} \neq 0$) або глибиною занурення ($\Delta h_{wi} \neq 0$).

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

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

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

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

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

($\text{NSS}_R + \text{NSS}_L$) act along the transverse y -axis), the CDC block determines the closest in distance to the i -th follower AUV threat and implements controls according to the recommendations (3.30). If the distances to these threats are the same, the maneuver is performed with speed ($\Delta v_{wi} \neq 0$) or immersion depth ($\Delta h_{wi} \neq 0$).

Obviously, such a control solution provides the i -th follower AUV with a constant presence in the group due to the presence of constant hydroacoustic contact with the nearest AUV-neighbor and, thus, is justified.

In the presence of three threats that are approaching at the same time (the underwater motion worst case scenario), the CDC- W module must determine the two largest collision threats, and then calculate the control actions according to the preliminary scenario with two threats. In this case, a horizontal maneuver is permissible in order to evade existing threats in the direction w , from which there is no threat.

In the presence of four threats simultaneously, approaching the i -th slave AUV (the most dangerous variant of the underwater movement scenario), the CDC- W module must determine the two largest collision threats, and then calculate the control actions for evasion according to the preliminary scenario with two threats.

In this case, since the evasion maneuver from the nearest neighbor AUV is limited due to the presence of a threat from each controlled direction, the safest is an emergency change in the i -th follower AUV immersion depth.

The synthesis of the fuzzy controllers for each of the described variants of the navigation environment is a trivial engineering problem and is not considered here.