

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

### CHAPTER 5. EXPERIMENTAL RESEARCHES OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE CONTROL LAWS AS A GROUP «AGENT»

#### 5.1. Короткий опис організації морського натурного експерименту

#### 5.1. Brief description of the organization of the marine full-scale experiment (or field trials)

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

Розглянемо можливі варіанти організації такого експерименту.

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

- вибору акваторії достатнього розміру, щоб система керування рухом АНПА мала можливість функціонувати без будь-яких обмежень;
- проведення низки організаційних заходів щодо забезпечення захисту акваторії від руху суден та інших плавзасобів, виключення на її території видів людської діяльності, які можуть обмежити проведення експерименту;

- розробки приладового та метрологічного забезпечення для виміру характеристик параметрів руху групи АНПА; для цього необхідно виконати розмітку морського полігону, на дні обраної акваторії виконати низку підготовчих робіт щодо навігаційного забезпечення групового руху АНПА.

Досвід Науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова минулих десятиліть, отриманий

5.1.1. Features of the marine full-scale experiment. The formulation of the problem of marine full-scale experiments and the processing of their results are usually difficult to implement, therefore, appropriate programs and methods are being developed that allow conducting research in natural conditions.

Consider the possible options for organizing such an experiment.

The organization and conduct of a marine full-scale experiment for the AUV ACS functionality check require preliminary preparatory work, namely:

- selection of a water area of sufficient size so that the AUV motion control system can function without any restrictions;
- implementation a number of organizational measures to ensure the protection of the water area from the movement of vessels and other watercraft, the exclusion of other types human activities on its territory that may limit the experiment conduct;

- development of instrumental and metrological support for measuring the characteristics of the movement parameters of a AUV group; to do this, it is necessary to mark the marine proving ground, at the bottom of the selected water area, perform a series of preparatory operations for navigational support for AUV group motion.

The experience of the Scientific Research Institute of Underwater Technology of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding over the last ten years, obtained

у результаті виконання низки міжнародних і вітчизняних контрактів по створенню і передачі замовникам нових засобів підводної робототехніки [26; 100], свідчить про необхідність виділення та спеціальної підготовки акваторії для проведення експерименту як одну з головних умов, що мають забезпечити його успішне проведення.

Зокрема, для реалізації завдань дослідницькій роботі необхідно виділити акваторію з розмірами не менше з розмірами не менше 100 м x 100 м, глибиною не менше 10 м та рівною донною поверхнею. На донній поверхні необхідно встановити гідроакустичні маяки, які будуть фіксувати рух досліджуваних АНПА і, таким чином, утворювати інформаційну основу для цифрового документування процесу і результатів випробувань (рис. 5.1).

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

as a result of the implementation a number of international and domestic contracts for the creation and transfer to customers of new means of underwater robotics [26; 100], indicates the need for the allocation and special preparation of the water area for carrying out of the experiment as one of the main conditions ensuring its successful implementation.

In particular, to implement the tasks of the research work, it is necessary to allocate a water area with dimensions of at least 100 m x 100 m, a depth of at least 10 m and a flat bottom surface. It is necessary to install hydroacoustic beacons on the bottom surface, which will record the movement of the tested AUVs and thus form the information basis for digital documentation of the process and test results (Fig. 5.1).

This is the most complete version of a marine full-scale experiment for the task, however, for its implementation it is necessary to use a large amount of high-cost hydroacoustic equipment, which is currently difficult to implement due to financial constraints.

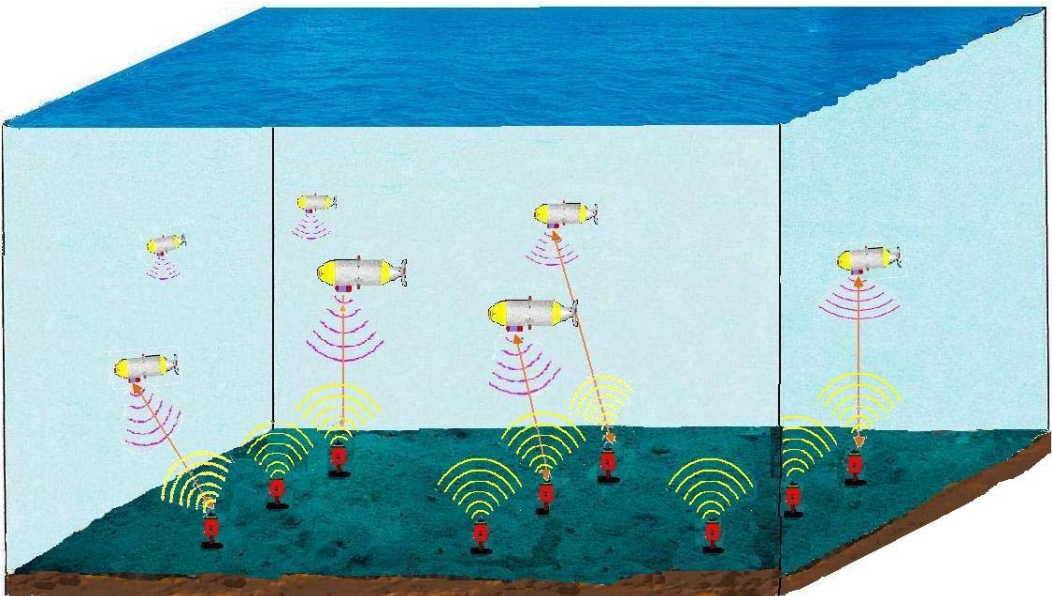


Рисунок 5.1 – Загальна схема проведення морського натурного експерименту  
 Figure 5.1 – General scheme of conducting a marine full-scale experiment

Тому авторами розроблено програму і методику проведення натурних випробувань системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом як «агентом» групи, яку можливо реалізувати на практиці з використанням прив'язного підводного апарата і макета радіокерованого катера [180].

5.1.2. Загальна схема випробування та характеристики залученого обладнання. Натурне випробування САК АНПА було виконане для перевірки її працездатності при реалізації основних режимів когезії й адгезії.

Оскільки застосування гідроакустичних сенсорів виявилось неможливим з-за фінансових обмежень, до експерименту залучено два імітатора АНПА, сенсорний контакт між якими реалізовано за допомогою акустичних приладів.

Схема натурального випробування узгодженого руху двох АНПА наведена на рис. 5.2.

Therefore, the authors have developed a «Program and methodology for field tests of the system of automatic control of an autonomous unmanned underwater vehicle as an «agent» of the group», which can be implemented in practice using a tethered underwater vehicle and a model of a radio-controlled boat [180].

5.1.2. General scheme of test and characteristics of the involved equipment. A full-scale test of the AUV ACS was carried out to check the performance in the implementation of the main modes of cohesion and adhesion.

Since the use of hydroacoustic sensors turned out to be impossible due to financial constraints, two AUV simulators were involved in the experiment, sensory contact between which was implemented using acoustic devices.

The scheme of full-scale test of the coordinated motion of two AUVs is shown in Fig. 4.2.

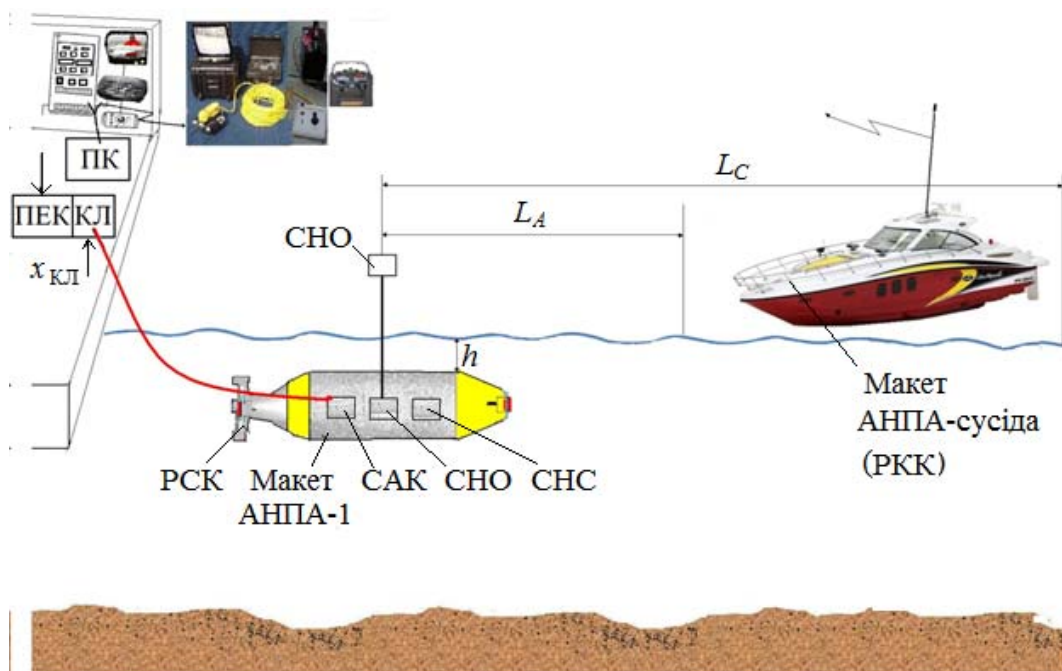


Рисунок 5.2 – Схема натурального випробування узгодженого руху двох АНПА  
Figure 5.2 – Scheme of a full-scale test of the coordinated motion of two AUVs

При виконанні натурних випробувань у якості дослідного АНПА-1 використано телекерований ненаселений підводний апарат, керований програмним забезпеченням з поста енергетики й керування (ПЕК).

Дане рішення дозволяє зберігати та аналізувати експериментальні дані в режимі реального часу.

Зв'язок АНПА-1 з ПЕК здійснюється за допомогою кабелю зв'язку.

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

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

Наведена система у якості сенсорів зворотного зв'язку використовує систему сенсорів навігаційної обстановки (ЧО) та штатну систему навігаційних сенсорів (СНС) підводного апарата АНПА-1 (рис. 5.3).

When performing full-scale tests, a remote-controlled underwater vehicle controlled by software from the power and control post (PCP) was used as an experimental AUV-1.

This solution allows storing and analyzing experimental data in real time.

Communication between AUV-1 and the PCP is carried out via a communication cable.

The presence of a cable can have a significant impact on the quality of control processes, so the control of its minimum length is automated.

AUV-1 is driven by its own PSC, the control signals of which are produced in the AUV-1 ACS – the single AUV motion ACS as a group «agent» in the conditions of navigational proximity of other AUVs (see section 2.4.2).

The specified system uses the navigational situation sensors (NSS, SNE) system and the standard system of navigation sensors (SNS) of the underwater vehicle AUV-1 (Fig. 5.3) as feedback sensors.



**Рисунок 5.3 – Зовнішній вигляд ЧО та її розташування на АНПА-1**  
**Figure 5.3 – External view of the NSS and its location arrangement on AUV-1**

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

Ultrasonic rangefinders model MB 1003-EZ0 manufactured by MaxBotix [181] was used as the NSS sensors.



У якості АНПА-2 (АНПА-сусіда) використано надводний радіокерований катер (РКК), керований оператором вручну з пульта керування (ПК) [182]. Катер оснащений додатковими відбивачами ультразвукових акустичних сигналів і забезпечує режими прямолінійного руху й плоскої циркуляції, що є достатнім для проведення натурних випробувань САК АНПА-1.

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

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

Блок-схема узагальненого алгоритму проведення морського натурального експерименту зображена на рис. 5.4.

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

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

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

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

As AUV-2 (AUV-neighbor), a surface radio-controlled boat (RCB) was used, controlled by the operator manually from the control console (CC) [182]. The boat is equipped with additional reflectors of ultrasonic acoustic signals and provides modes of rectilinear motion and flat circulation, which is sufficient for full-scale testing of the AUV-1 ACS.

Marine full-scale tests of the AUV ACS were carried out on the basis of the Delta Marine Laboratory of the Research Department of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding. During the tests, the distance controller operation experimental verification was carried out when the AUV-1 was operating in cohesion and adhesion modes, when the device deviated from the set course under the influence of an external disturbance, as well as under its PSC signal influence, which changes according to a certain harmonic law.

5.1.3. A brief description of the content of the marine full-scale test (natural) experiment. Full-scale tests consist of a series of experiments, each of which allows checking the performance of the AUV-1 ACS operating mode in the conditions of navigational proximity of the AUV-neighbor model.

A block diagram of the generalized method for conducting a marine field experiment is shown in Fig. 5.4.

The experiment begins with the input of the specified speed of rectilinear motion and heading of the AUV-1 by the operator. Next, 3 processes are executed in parallel.

If no objects are detected within the AUV-1 NSS visibility range (condition  $y_{11}$ ), then the vehicle moves in a straight line, maintaining the values of the movement process parameters set by the operator.

In the event of a third-party object presence in the NSS visibility zone, the AUV-1 motion ACS, performs one of the following actions:

– if the object is detected in the «Track Zone» passage zone (condition  $y_{12}$ ), AUV-1 will continue to move in a straight line along the given course;

– якщо об’єкт виявлено у зоні небезпеки «Danger Zone» (умова  $y_{13}$ ), САК АНПА-1 буде реалізовувати режим адгезії (набір правил HP1), тобто керуючі впливи, сформовані САК, будуть спрямовані на збільшення дистанції до об’єкта;

– якщо об’єкт виявлено у зоні притягання «Attraction Zone» (умова  $y_{14}$ ), САК апарата буде функціонувати в режимі когезії (набір правил HP2) і керуючі впливи САК будуть спрямовані на зменшення дистанції до об’єкта.

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

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

Результати виконання трьох зазначених процесів обробляються блоком обробки даних експерименту (ОДЕ), після чого перевіряється умова  $Y_2$  завершення поточного випробування (відповідно, умови  $y_{21}$  і  $y_{22}$ ).

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

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

– if the object is detected in the, «Danger Zone» (condition  $y_{13}$ ), the AUV-1 ACS will implement the adhesion mode (set of rules HP1), i.e. the control influences formed by the ACS will be aimed at increasing the distance to the object;

– if the object is detected in the Attraction Zone, the vehicle’s ACS will function in the cohesion mode (the set of rules HP2), that is, the control actions generated by the ACS will be aimed at reducing the distance to the object.

At the same time, the AUV-1 cable winch (CW) ACS minimizes external disturbances generated by the communication cable by controlling the process of removal/collection up the cable during the of the vehicle motion.

Also, during the experiment, the AUV-2 operator controls the movement of the RCB with the help of a special control console (CC).

The results of the three specified processes are processed by the experimental data processing (EDP) unit, after which the condition  $Y_2$  of the completion of the current test is checked (conditions  $y_{21}$  and  $y_{22}$ , respectively).

5.1.4. Preliminary preparation for sea trials. In the process of preliminary preparation for a full-scale experiment, the directional pattern of four ultrasonic rangefinders model MB 1003-EZ0 manufactured by MaxBotix were obtained. The directional pattern is one of the most important characteristics of distance sensors. It is a graphic representation of the area in which an object can be detected by the sensor. The principle of operation of ultrasonic sensors is based on measuring the passage (transit) time of direct and reflected ultrasonic waves.

Figure 5.5 shows the external view of the laboratory stand designed to determine the directional pattern of ultrasonic rangefinders model MB 1003-EZ0 involved in a marine field experiment.

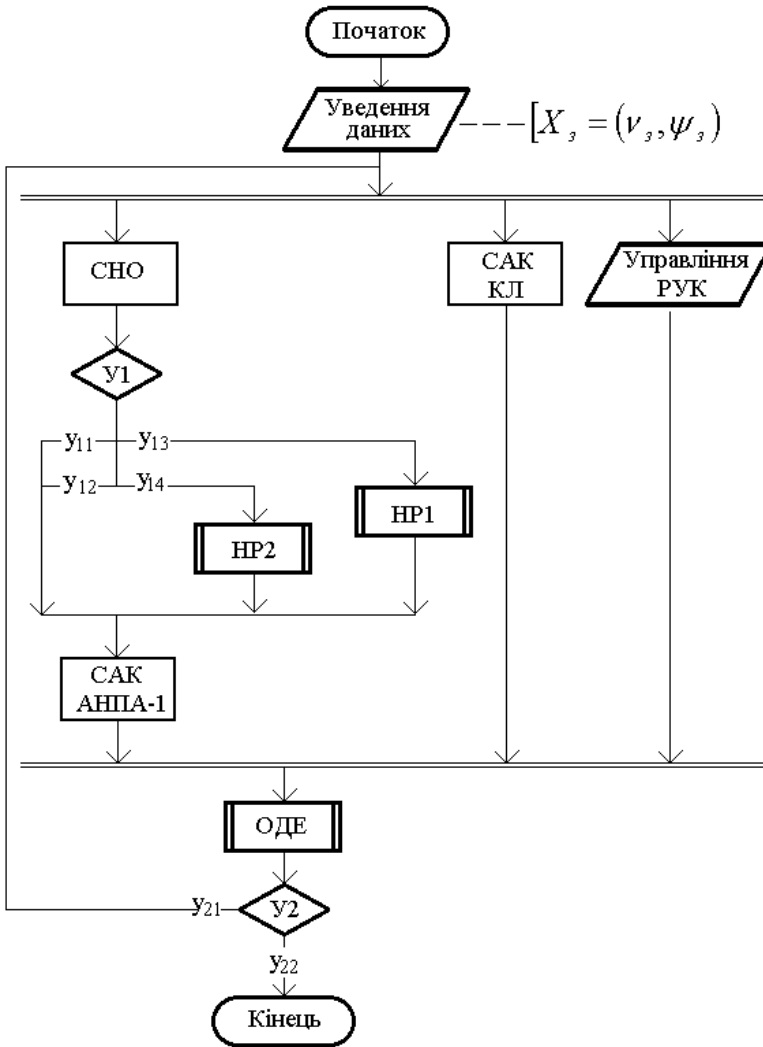


Рисунок 5.4 – Блок-схема узагальненого алгоритму проведення морського натурного експерименту

Figure 5.4 – Block diagram of the generalized algorithm for conducting a marine full-scale experiment

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

Підводний апарат устанавлюється на віддаленні  $h$  від сенсора таким чином, щоб його діаметральна площина була перпендикулярна прямій, проведеної через центр сенсора й центр величини АНПА-сусіда. Після чого апарат вручну переміщують

The laboratory experiment was performed according to the scheme shown in Fig. 5.6. The following is a brief description of the process of conducting the experiment.

The underwater vehicle is installed at a distance  $h$  from the sensor in such a way that its diametrical plane is perpendicular to the line drawn through the center of the sensor and the center of the value of the neighboring AUV. After that, the vehicle is manually

уздовж поздовжньої осі вліво до моменту, коли показання сенсора зміняться до значення, яке відповідає максимальній вимірюваній дистанції.

moved along the longitudinal axis to the left until the sensor readings change to the value that corresponds to the maximum measured distance.



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

**Figure 4.5 – Stand for determining the directional diagram of ultrasonic rangefinders: 1 – power supply unit; 2 – ultrasonic range finder model MB 1003-EZ0; 3 – oscilloscope; 4 – AUV-1 model**

Потім макет АНПА-сусіда зміщують в напрямку вихідного місця розташування до поновлення початкових показань сенсора та вимірюють відстань  $l_-$  між його початковою і поточною позиціями.

У такий же спосіб виконується вимірювання відстані  $l_+$  при русі макета АНПА-сусіда праворуч.

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

Результати експерименту представлені в табл. 5.1, а графічне подання діаграми спрямованості зображене на рис. 5.7.

Then the AUV-neighbor layout is displaced in the direction of the initial location until the initial sensor readings are updated, and the distance  $l_-$  between the initial and current location is measured.

In the same way, the distance  $l_+$  is measured when the neighbor AUV model shifted to the right.

These measurements are repeated for the range  $h = [1.0; 3.0]$  m with a step of 0.5 m. For the obtained distances, the maximum angles of deviation of the center from the size of the AUV-neighbor model from the sensor center are calculated.

The experiment results are presented in Table. 5.1, and a graphical representation of the radiation pattern is shown in Fig. 5.7.



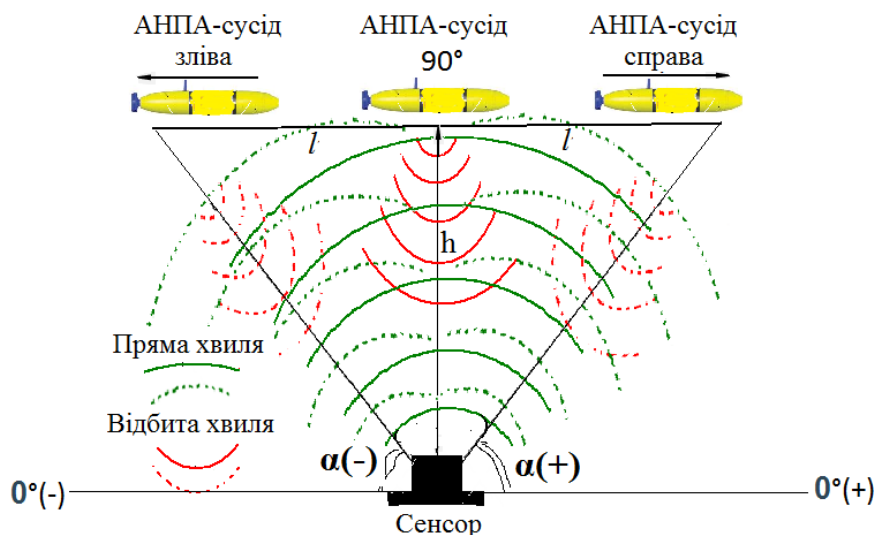


Рисунок 5.6 – Схема проведення лабораторного експерименту для зняття діаграми спрямованості ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0

Figure 5.6 – Scheme of conducting a laboratory experiment for plotting points for the directional diagram of ultrasonic range finders of the MB 1003-EZ0 model

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

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

Knowing the signal propagation time (to the target and in the opposite direction), the distance to the target is determined. The ultrasound propagation speed in air is approximately 344 m/s at 20°C (the same as sound).

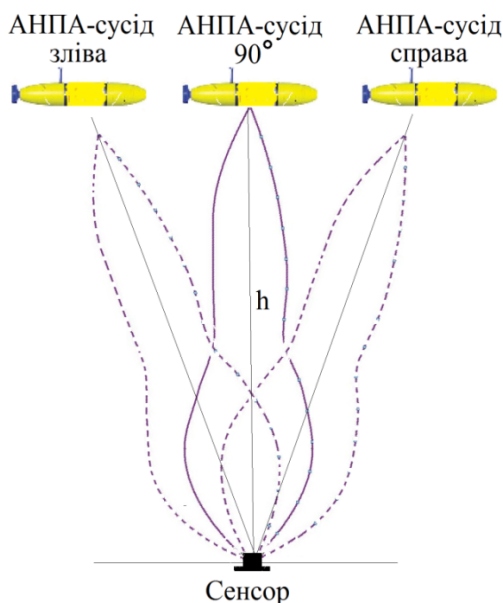
Therefore, the time  $T$  required for signal propagation to the AUV-2 layout  $x$  (cm) and back will be:

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

Таблиця 5.1. Результати лабораторного дослідження

Table 5.1. Results of laboratory research

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



**Рисунок 5.7 – Експериментально знята діаграма спрямованості**  
**Figure 5.7 – Directional pattern experimentally taken**

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

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

По-перше, якщо застосовуються декілька ідентичних сенсорів (наприклад, сенсори, що вимірюють об'єкт, який рухається), об'єднання спостережень поліпшить оцінку положення й швидкості цього об'єкта.

По-друге, крім метрологічних характеристик важливе значення має можливість групової роботи декількох сенсорів, як буде показано в наступному випробуванні із чотирма сенсорами одночасно.

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

The resulting directional diagrams show that in order to ensure high-quality control of the AUV-1 distance to objects that pose a navigational threat, it is necessary to place the sensors so that the straight lines passing through their centers are at an angle of no more than  $10^\circ$  from each other.

5.1.5. Using a group of sensors to determine the position of a neighboring AUV. The simultaneous use of multitude sensors provides a more accurate determination of the position and speed of the AUV.

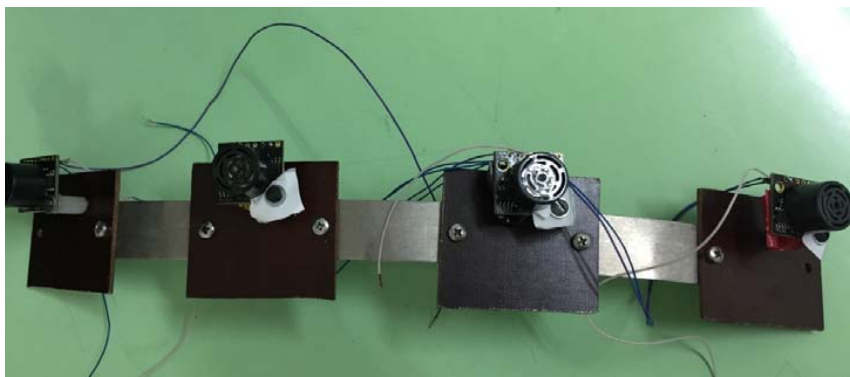
First, if several identical sensors are used (for example, identical sensors tracking a moving object), combining the observations will improve the estimation of the position and velocity of this object.

Secondly, in addition to metrological characteristics, the possibility of group work of multiple sensors is important, as will be shown in the following test with four sensors simultaneously.

The practice of the research laboratory «Delta» shows that it is advisable to use 4 sensors for greater efficiency in detecting objects.

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

Fig. 5.8 shows the external views of 4 sensors – Ultrasonic Rangefinder MB1003–EZ0 model, involved in the marine natural experiment.



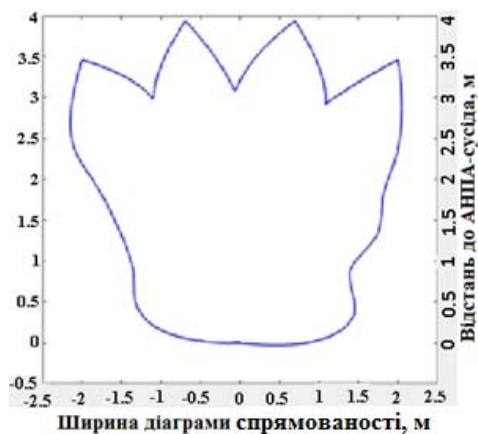
**Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд групи ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0, залучених до участі у морському натурному експерименті**  
**Figure 5.8 – External view of a group of ultrasonic rangefinders of the MB 1003-EZ0 model involved in the marine full-scale experiment**

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

Diagrams obtained in table 5.1, combined in such a way as to achieve the maximum possible width of the system's directional diagram without significantly reducing the maximum object recognition distance (Fig. 5.9).



а)



б)

**Рисунок 5.9 – Діаграма спрямованості чотирьох ультразвукових далекомірів моделі MB 1003-EZ0: а) розташування сенсорів; б) результуюча діаграма**  
**Figure 5.9 – Directional diagram of four ultrasonic rangefinders of the MB 1003-EZ0 model: a) locations of sensors; b) the resulting directional diagram**

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

For the considered sensors, this effect can be achieved by arranging them in such a way that the straight lines passing through their centers are at an angle of no more than  $10^\circ$  to each other. At the same time, the width of the directional pattern in the near zone ( $h = 0.3...2$  m) was  $2.5...3$  m, and in the far zone ( $h = 2...3$  m) – 4 m.

## 5.2. Основні результати морських натурних випробувань САК АНПА

### 5.2. The main results of full-scale tests of AUV ACS

У якості такого судна було залучено науково-дослідне судно «Дельта» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. На рис. 5.10 показано фотофрагменти випробувань.

The research vessel «Delta» of the Admiral Makarov National Shipbuilding University was involved as such a vessel. Fig. 4.10 shows photofragments of tests.

Морський натурний експеримент проводився згідно алгоритму, наведеному на рис. 5.4, у такій загальній послідовності:

The marine field experiment was carried out according to the algorithm shown in Fig. 5.4, in this general sequence:

1) Оператор задає параметри руху АНПА-1, активує САК АНПА-1 і очікує моменту завершення перехідного процесу.

1) The operator sets the AUV-1 motion parameters, activates the AUV-1 ACS and waits for the moment of completion of the transient process.

2) У процесі керованого руху АНПА-1 оператор за допомогою ПК РКК керує рухом АНПА-сусіда, створюючи умови для перевірки адекватності функціонування режимів адгезії й когезії.

2) In the process of controlled AUV-1 movement, the operator, using the RCB CC, controls the AUV-neighbor motion, creating conditions for checking the functioning adequacy of the adhesion and cohesion modes.

При цьому виконується цифрове документування перехідних процесів, які протікають в САК АНПА-1.

However, digital documentation of transient processes occurring in the AUV-1 ACS is carried out.

3) Дані, накопичені в ході проведення експерименту, зберігаються у блоці ОДЕ, після чого проводиться аналіз якості процесів керування рухом АНПА-1 і коригування налаштувань регуляторів САК.

3) The data accumulated during the experiment are stored in the ODE block, after which the quality of the AUV-1 motion control processes is analyzed and the settings of the ACS controllers are adjusted.

4) Пункти 1-3 наведеної послідовності повторюються до моменту досягнення бажаної якості перехідних процесів і процесів керування груповим рухом.

4) Points 1-3 of the above sequence are repeated until the desired quality of transients and group motion control processes is achieved.



**Рисунок 5.10 – Фотофрагменти морських натурних випробувань САК АНПА як «агента» групи: 1 – обидва макети АНПА відділені один від одного і рухаються з заданими швидкостями; 2 – макет АНПА-1 і макет АНПА-сусіда перебувають у зоні притягання, тому САК макетом АНПА-1 реалізує режим когезії (макет АНПА-1 наближається до макета АНПА-сусіда); 3 – макети АНПА розташовані занадто близько; 4 – макети розташовані у зоні небезпечного зближення; САК макета АНПА-1 змінює курс апарата на віддалення від макета АНПА-сусіда; 5 – макет АНПА-1 віддалився від макета АНПА-сусіда і режим адгезії виконано; 6 – безпечний режим, коли обидва макети почали вільно рухатись заданими курсами та з заданими швидкостями**

**Figure 5.10 – Photo fragments of sea field tests of the AUV ACS as a group "agent":**  
**1 – both AUV models are separated from each other and move at specified speeds;**  
**2 – the AUV-1 model and the neighbor AUV model are in the attraction zone, therefore, the AUV-1 model implements the cohesion mode with the AUV-1 model (the AUV-1 model approaches the neighbor AUV model);**  
**3 – AUV models are located too close;**  
**4 – models are located in the danger zone; SAC of the AUV-1 model changes the course of the device at a distance from the model of the AUV-neighbor;**  
**5 – the AUV-1 model moved away from the neighboring AUV model and the adhesion mode was completed;**  
**6 - safe mode, when both models began to move freely along the given courses and at the given speeds**

### 5.3. Аналіз результатів морських натурних випробувань САК АНПА

#### 5.3. Analysis of the results of AUV ACS marine full-scale test

Розглянемо результати експериментальної перевірки працездатності САК АНПА-1, отримані шляхом морських натурних випробувань [180].

Експериментальне дослідження регулятора дистанції АНПА-1 почнемо з пере-

Consider the results of an experimental test of the AUV-1 ACS functionality test, obtained by marine field tests [180].

The experimental study of the AUV-1 distance controller was started by checking the adhesion mode. Before



вірки режиму адгезії. Перед початком експерименту АНПА-1 був виведений на відстань 0,5 м від АНПА-сусіда.

Графіки перехідного процесу наведені рис. 5.11.

При амплітуді задачі керування, рівній 1,5 м, перехідний процес має аперіодичний характер з перерегулюванням 6,7%. Тривалість перехідного процесу склала 25 с. АНПА-1 рухається заданим курсом, за винятком ділянки завершення перехідного процесу (часовий інтервал 15...20 с). У цьому випадку РСК апарата не може забезпечити задану швидкість зміни курсу, що призводить до появи перерегулювання.

Розглянемо тепер працездатність САК АНПА-1 в режимі когезії. Графіки перехідних процесів зображені на рис. 5.12.

Перехідний процес також має аперіодичний вид. Перерегулювання склало 2 %, а тривалість перехідного процесу – 10 с.

Перевіримо тепер працездатність САК АНПА-1 при впливі на його корпус зовнішніх збурень. Графіки перехідних процесів для даного режиму зображені на рис. 5.13.

На початку експерименту апарат був відведений на відстань 1,5 м від АНПА-сусіда. По закінченні перехідного процесу шляхом віддалення АНПА-сусіда від АНПА-1 було створено збурюючий вплив

the start of the experiment, AUV-1 was withdrawn to a distance of 0.5 m from the AUV-neighbor.

Graphs of the transient process are shown in Fig. 5.11.

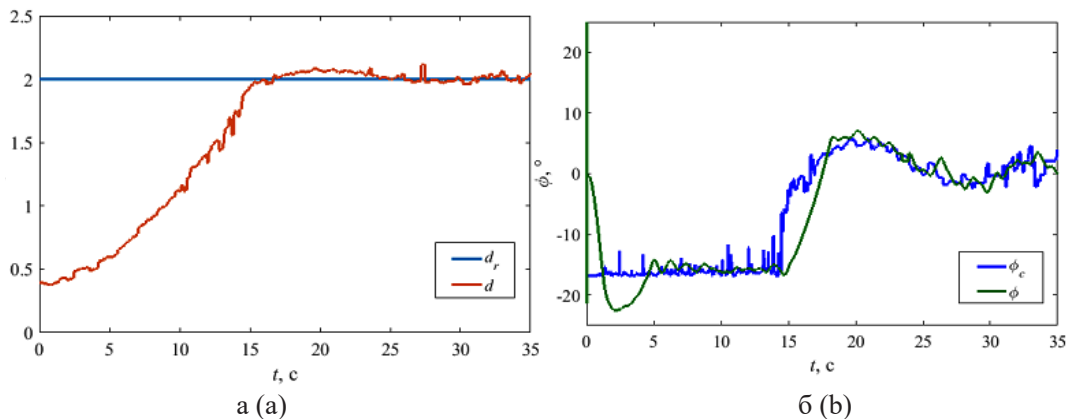
With the control task amplitude equal to 1.5 m, the transient process has an aperiodic character with an overshoot of 6.7%. The transition process duration was 25 seconds. AUV-1 moves on the specified course, except for the section of the completion of the transient process (time interval 15...20 s). In this case, the vehicle PSC cannot provide the specified rate of course change, which leads to the appearance of the overshoot.

Next, let us study the AUV-1 ACS operability in the cohesion mode. Graphs of transient process are shown in Fig. 5.12.

The transition process also has an aperiodic character. The overshoot is 2 %, and the transient process duration is 10 s.

Now let's check the AUV-1 ACS operability under the influence of external disturbances on its hull. Graphs of transient processes for this mode are shown in Fig. 5.13.

At the beginning of the experiment, the device was moved to a distance of 1.5 m from the neighboring AUV. At the end of the transition process, a disturbance effect with the amplitude of 0.8 m was generated by moving the neighbor-



**Рисунок 5.11 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії:**  
**а) дистанція; б) керуючий вплив**  
**Figure 5.11 – Graphs of the transition process in the adhesion mode:**  
**a) distance; b) controlling influence**

амплітудою 0,8 м. Наслідки даного впливу САК АНПА-1 усунула через 15 с з моменту закінчення його прикладення.

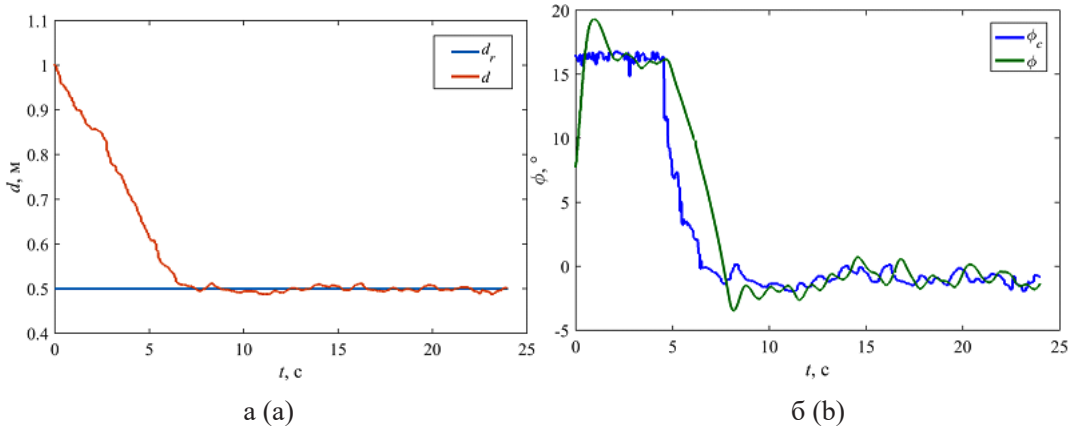
Дослідимо тепер динамічні властивості САК АНПА-1 шляхом завдання сигналу керування, який змінюється за гармонічним законом (рис. 5.14). Сигнал керування має наступні параметри: зсув – 1,5 м, амплітуда – 0,5 м; частота – 0,2 с<sup>-1</sup>.

Перехідний процес завершується через 5 с з після початку експерименту.

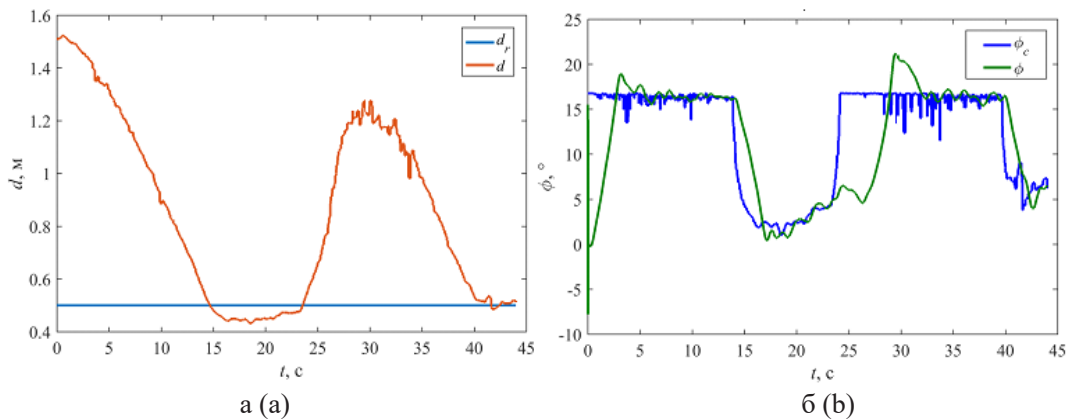
AUV away from AUV-1. The effects of this action were eliminated by the AUV-1 ACS 15 seconds after the end of its application.

Let us now investigate the dynamic properties of the AUV-1 ACS by setting a control signal, which changes according to a harmonic (sinusoidal) law (Fig. 5.14). The control signal has the following parameters: offset – 1.5 m, amplitude – 0.5 m; frequency – 0.2 s<sup>-1</sup>.

The transient process ends 5 s after the start of the experiment.



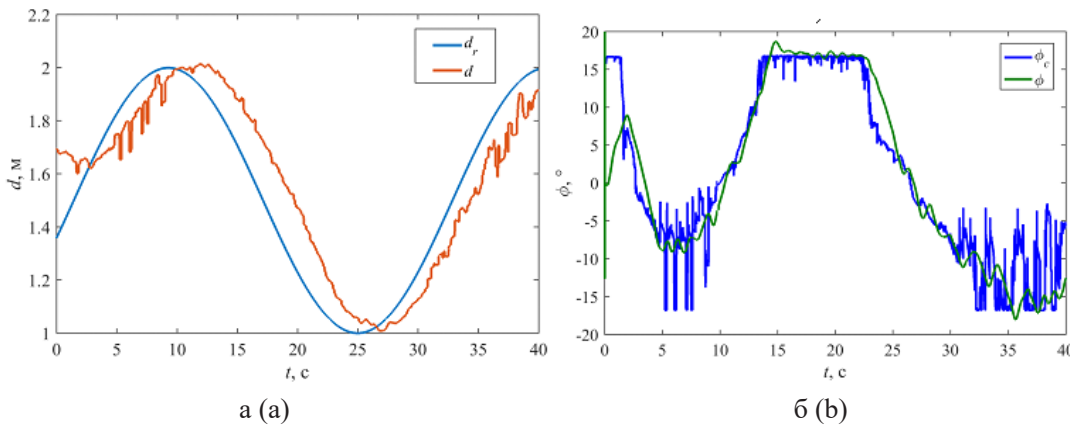
**Рисунок 5.12 – Графіки перехідних процесів в режимі когезії**  
 а) дистанція; б) керуючий вплив  
**Figure 5.12 – Graphs of the transition process in the cohesion mode:**  
 a) distance; b) controlling influence



**Рисунок 5.13 – Графіки перехідних процесів при дії зовнішніх збурень:**  
 а) дистанція; б) керуючий вплив  
**Figure 5.13 – Graphs of transient processes under the influence of external disturbances:**  
 a) distance b) control influence

Апарат рухається по синусоїдальній траєкторії із запізнюванням щодо сигналу керування в 2 с.

The vehicle moves along a sinusoidal path with a delay of 2 s relative to the control signal.



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

**Figure 5.14 – Graphs of transient processes with a harmonic control signal: a) distance; b) control influence**

Сигнал керування має наступні параметри: зсув – 1,5 м, амплітуда – 0,5 м; частота – 0,2  $s^{-1}$ . Перехідний процес завершується через 5 с з після початку експерименту. Апарат рухається по синусоїдальній траєкторії із запізнюванням щодо сигналу керування в 2 с.

The control signal has the following parameters: displacement – 1.5 m, amplitude – 0.5 m; frequency – 0.2  $s^{-1}$ . The transient process ends 5 s after the start of the experiment. The device moves along a sinusoidal trajectory with a delay of 2 s relative to the control signal.

За результатами натурних випробувань можна зробити висновок про прийнятність запропонованого підходу для реалізації законів групового керування рухом АНПА.

Based on the results of the marine full-scale tests, it can be concluded that the proposed approach acceptability of the implementation of the AUV group motion control laws.

Поліпшення показників якості процесів керування можна досягти застосуванням більш досконалої компонентної бази (сенсорів дистанції, навігаційної системи) і оптимізацією параметрів регулятора курсу як складової САК рухом АНПА-1 як «агентом» групи.

Improving the quality indicators of control processes can be achieved by using a more advanced component base (distance sensors, navigation system) and optimizing the parameters of the course controller as a component of the AUV-1 motion ACS as a group «agent».

## ВИСНОВКИ CONCLUSIONS

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

Аналіз сучасних методів групового застосування автономних ненаселених підводних апаратів свідчить про переважне їх застосування для проведення пошукових підводних робіт, а також наукових та природоохоронних досліджень, які містять пошукову складову.

Концептуально у розвитку методів групового використання таких апаратів спостерігається розвиток двох напрямків автоматизації – розвиток індивідуальних характеристик окремого підводного апарата як «агента» групи та розвиток методів керування груповим застосуванням підводних апаратів.

Для кожного із зазначених напрямків автоматизації характерним є наявність трьох основних рівнів розвитку автоматизації – базового рівня автоматизації окремого автономного ненаселеного підводного апарата, локального рівня групового керування підводними апаратами та глобального рівня автоматизації підводних пошукових місій із застосуванням групи автономних ненаселених підводних апаратів.

У монографії на основі аналізу сучасних підходів до групового керування автономних ненаселених підводних апаратів показано, що прикладну наукову проблему автоматизації процесів групового використання підводними апаратами можна представити у вигляді чотирьох відносно незалежних задач: формулювання мети (кінцевого продукту) підводної місії, яку необхідно виконати групі підводних апаратів шляхом одночасного виконання низки підводних робіт; розробка програми автоматичного

In the monograph, based on an analysis of the current state of the art in the field of underwater robotics, it is shown that one of the actively developed areas is the group application of autonomous underwater vehicles. In global practice, this applied area of robotics has been named Collective Cognitive Robots (CoCoRo) and is currently at the initial stage of development.

The analysis of modern methods of group application of autonomous underwater vehicles indicates their predominant use for conducting underwater search operations, as well as scientific and environmental research containing the search component.

Conceptually, in the development of methods of the group application of such vehicles, the development of two directions of automation is observed – the development of individual characteristics of an individual underwater vehicle as a group agent and the development of methods of group application control of underwater vehicles.

Each of the indicated directions of automation is characterized by the presence of three main levels of automation development – the basic level of automation as an individual autonomous underwater vehicle, the local level of group control of underwater vehicles and the global level of automation of underwater search missions using a group of autonomous underwater vehicles.

In the monograph, based on the analysis of modern approaches to the group control of autonomous underwater vehicles, it is shown that the applied scientific tasks of group application process automation of underwater vehicles can be represented in the form of four relatively independent tasks: by simultaneously performing a number of underwater operations; development of a program for the automatic execution of an underwater mission by a group of

виконання підводної місії групою підводних апаратів (стратегії керування); керування паралельними процесами виконання розробленої програми виконання підводної місії; автоматичне керування окремим підводним апаратом як «агентом» групи.

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

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

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

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

- удосконалення процесів автоматизації керування окремими видами морських пошукових операцій;

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

Наведені у монографії розв'язки поставлених задач утворюють теоретичне підґрунтя для інженерів-розробників систем автома-

underwater vehicles (control strategy); parallel processing control for the developed program implementation for underwater mission execution; automatic control of an individual underwater vehicle as a group «agent».

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

Based on the analysis of the existing methods of automatic control of a group of autonomous underwater vehicles, the monograph proposes a list of typical tasks of controlling them in single and group application modes when moving in difficult navigation conditions, a list of navigation support tasks for a single underwater vehicle and their group application. As a result of the analysis of the current state in the direction of Co-Co-Ro automation technologies, the main scientific tasks of the research were formulated:

- improvement of automatic motion control of a single autonomous underwater vehicle as a group agent in the conditions of navigational proximity of other underwater vehicles of the group;

- improvement of group search automation processes as one of the basic algorithms for group control of search autonomous underwater vehicles;

- improvement of control automation processes of certain types of marine search operations;

- improvement of control processes of unmanned surface vessels as carriers of groups of autonomous underwater vehicles.

The solutions of the tasks presented in the monograph form the theoretical basis



тичного керування автономними ненаселеними підводними апаратами та безкіпажними надводними суднами як носіями такого виду засобів морської робототехніки.

for automatic control systems engineers-developers of autonomous underwater vehicles and surface vessels as carriers of this type of marine robotics facilities.