

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ГРУПИ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

CHAPTER 2. AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES GROUP CONTROLLED MOTION RESEARCH METHODS

2.1. Попередні зауваження

2.1. Preliminary remarks

Для успішного розв'язання сформульованих задач дослідження, в першу чергу, необхідно виконати синтез системи автоматичного керування рухом одиночного АНПА в умовах навігаційної близькості інших АНПА його групи. Це забезпечить безпечний рух кожного окремого АНПА групи в усіх режимах її функціонування при виконанні підводної місії.

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

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

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

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

Зазвичай, для таких перевірок дослідники морської робототехніки широко застосовують метод комп'ютерного експе-

In order to successfully solve the research formulated tasks, first of all, it is necessary to perform the automatic control system synthesis for the single AUV motion in the conditions of the navigational proximity of other AUVs of its group. This will ensure the safe movement of each individual AUV of the group in all modes of its operation during the performance of an underwater mission.

The second task is to develop analytical dependencies that describe the AUV group motion organization, which should form the theoretical basis for the construction of automatic control systems of their group motion when performing search missions.

Finally, the third task of the research is the development and substantiation of a controlled process of planning and execution of a marine search operation using the AUV group, which should increase the underwater search operations productivity during their execution in remote waters.

It is expedient to check the efficiency of the specified theoretical problems solution by means of marine full-scale experiment, involving one (for the first task) and several underwater vehicles (for the second task), installing on them the synthesized ACS of the appropriate purpose.

However, the organization and conduct of marine field experiments at this time is a complex operation from a technical point of view and high-value from the standpoint of its financing.

Typically, for such tests, marine robotics researchers widely use the method of computer

рименту, тобто досліджень математичної моделі об'єкту за допомогою ЕОМ [60; 61].

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

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

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

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

Розглянемо особливості організації й застосування вказаних методів.

experiment, i.e. the mathematical modelling study of the object using a computer [60; 61].

The essence of the computer experiment is that the effectiveness of the developed ACS is tested by digital modeling of the AUV processes dynamics control using mathematical models that describe the underwater vehicle interaction with the aquatic environment.

At the same time, synthesized regulators and AUV ACS as a whole are programmatically realized in the computer that considerably reduces the check processes of their functioning efficiency.

This type of experiment can only be conditionally be classified as an experiment, because it does not reflect the natural phenomena, but only a numerical implementation of the research object mathematical model created by the researcher. Therefore, the AUV mathematical models and their elements are given below, the reliability of which has been verified and confirmed by long-term successful application both at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding and by foreign scientists.

However, it is known that the method of computer experiment provides results with some approximation, because the underlying mathematical models of the control object do not fully take into account all its features that occur in real operation [62]. Therefore, in the work for one of the most complex modes of operation of the synthesized ACS provides for a marine field experiment.

Consider the features of the organization and application of these methods.

2.2. Основні складові математичної моделі одиночного АНПА групи

2.2. The main components of the mathematical model of a single AUV of the group

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

Mathematical modeling is an effective tool for the AUV research, as field experiments with such complex objects require large material resources, significant financial and organizational costs [63; 64].

Зазвичай, математичне моделювання керованого руху АНПА представляють сукупністю наступних інформаційних, електромеханічних та гідромеханічних систем як складових математичної моделі об'єкту керування, що взаємодіють між собою:

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

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

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

- зовнішній корпус АНПА (ЗК) – це тверде тіло, що рухається у воді під дією

Typically, mathematical modeling of AUV controlled motion is a set of the following information, electromechanical and hydro-mechanical systems as components of the mathematical model of the object of control, interacting with each other:

- AUV information system (IS) – AUV spatial state sensors and its IMS dynamic characteristics (angles, angular velocities and accelerations, linear displacements, velocities and accelerations, etc.); further, the operation of these sensors is considered ideal, which allows ignoring their measurement errors; in addition, AUV as a group “agent” is characterized by sensor signals about the dangerous approach of AUVs-neighbors in the group (collision threat) and an unacceptable increase in the distance to them (threat of loss of communication between vehicles and “dispersion” of the AUV group);

- AUV automatic motion control system (ACS, executive level) – functional structure and software environment designed for processing information from sensors and for generating control signals for AUV actuators (primarily – the propulsion and steering complex); the ACS specific model is determined as a result of the synthesis of individual regulators and the developed or adopted ACS generalized structure;

- AUV propulsion and steering complex (PSC) is one autonomously operating stern engine (counter-rotating propeller), behind it are rotary rudders to control the angular movements of the vehicle around the vertical and transverse axes; the screw propeller (SP) receives mechanical energy from the corresponding propulsion electric motor (PEM) through the shaft line; from the standpoint of mathematical modeling for such complexes, it is necessary to take into account the nonlinear dependences of the SP thrust and the angular rotation frequency [65];

- the AUV external hull (EH) is a solid body moving in the water under the PSC action and perceiving the hydrodynamic resistance forces, taking into account the

РСК і сприймає сили гідродинамічного опору з урахуванням приєднаних мас води у динамічних режимах; на корпус АНПА діють також сили зовнішніх збурень;

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

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

– робоче середовище (вода) розглядається як ідеальна незбурена рідина;

– вектор упору рушії та сили зовнішніх збурень прикладаються до центру мас АНПА і не створюють диферентів і кренів;

– АНПА у воді має нульову плавучість.

water added masses in dynamic modes; external disturbances forces also act on the AUV hull;

– forces of external disturbances F_{ED} acting on the AUV external hull (EH) – wave and wind action (during the surface movement of the AUV), flow;

In the development AUV elements mathematical models in the work, the following general assumptions are made, which do not distort the physics of the phenomena occurring in the research object:

– the working environment (water) is considered as an ideal undisturbed fluid;

– the motor thrust vector and the forces of external disturbances are applied to the AUV center of mass and do not create pitch and rolls;

– AUV in water has zero buoyancy.

2.3. Математичне моделювання динаміки одиночного АНПА як об'єкта керування

2.3. Mathematical modeling of single AUV dynamics as a control object

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

2.3.2. Загальна форма рівнянь динаміки одиночного АНПА як твердого тіла у потоці води. Зазвичай рух окремого АНПА розглядається згідно законам механіки твердого тіла в тривимірному водному просторі з шістьма ступенями свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центра мас, інші три – обертання твердого

2.3.1. General approach to building a mathematical model. As a basic mathematical model of the group single AUV, the dependencies from [64] were used in the work, where the AUV outer (external) hull is considered as a solid body moving in an ideal undisturbed fluid. This makes it possible to ignore the force interactions between its elements, which have mass. To study the controlled motion of the EH, we will use earth-based coordinate system (EBCS) and mobile body-fixed coordinates (MBFC) with the AUV hull, which are widely used by researchers of maritime mobile objects. The main dependencies between the coordinate system and the kinematic parameters of the AUV are given in Appendix B.

2.3.2. General form of equations of dynamics of a single AUV as a rigid body in the water flow. Usually, the motion of an individual AUV is considered according to the laws of rigid body mechanics in a three-dimensional water space with six degrees of freedom. Three of them characterize the linear displacements of the center of mass, the other

тіла відносно центра мас. Кожному ступеню свободи відповідає одна швидкісна координата, у якості якої виступає проєкція вектора лінійної або кутової швидкості на відповідну вісь обраної системи координат [64].

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

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

де: V – матриця швидкісних кінематичних параметрів АНПА; R – матриця позиційних кінематичних параметрів АНПА; I – матриця власних та приєднаних мас АНПА; T – матриця рівнодіючих сил та моментів, які діють на АНПА; K – матриця, яка враховує переносну швидкість при взятті похідної по відношенню до ЗСК; K_V – матриця зв'язку поступального та обертового рухів АНПА; V_s – матриця поправки на швидкість течії.

Індекс A знаку диференціала означає, що похідна розраховується відносно базису A , тобто базису ЗСК. Індекс B знаку диференціала означає, що похідна розраховується відносно базису B , тобто базису БСК.

Елементи матриць основного закону динаміки утворюються наступним чином:

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

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

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

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

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

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

three – rigid body rotation about the center of mass. Each degree of freedom corresponds to one velocity coordinate, which is the projection of the linear or angular velocity vector onto the corresponding axis of the selected coordinate system [64].

The basic law of AUV dynamics in matrix form has the following form [64]:

where: V – AUV velocity kinematic parameters matrix; R – AUV positional kinematic parameters matrix; I – matrix of AUV own and added masses; T – matrix of resultant forces and moments acting on the AUV; K – matrix, taking into account the transfer rate when taking the derivative with respect to MBFC; K_V – AUV translational and rotational movement; V_s – correction matrix on the current velocity.

Index A of the differential sign means that the derivative is calculated relative to base A, that is, MBFC base. Index B of the differential sign means that the derivative is calculated relative to base B, that is, EBCS base.

The matrix elements of the basic law of dynamics are formed as follows:

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

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

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

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

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

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

Елементи матриці Λ залежать виключно від геометрії зовнішньої поверхні АНПА [66].

where: v_x, v_y, v_z – projections of the AUV translational velocity vector with respect to water on the MBFC axis; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – projections of the AUV rotating velocity vector with respect to water on the MBFC axis; x, y, z – coordinates of the AUV's center of mass in EBCS; θ, φ, ψ – AUV roll, pitch and yaw angles (Euler angles); M – matrix of AUV own masses and moments of inertia; Λ – matrix of added water masses; m – AUV own weight mass; J_x, J_y, J_z – AUV moments of inertia, calculated along the corresponding MBFC axes; λ_{ij} – added masses of water, $i=1, 2, \dots, 6$, $j=1, 2, \dots, 6$; \vec{F}, \vec{M} – vectors of the resultant forces and moments acting on the AUV, respectively; F_x, F_y, F_z – projections of the resultant force vector on the MBFC axis; M_x, M_y, M_z – projections of the resultant torque vector on the MBFC axis; K_v – matrix of connection between MBFC and EBCS; K_ω – AUV rotational motion coupling matrix; $i_x, i_y, i_z, j_x, j_y, j_z, k_x, k_y, k_z$ – projections of MBFC basis vectors on the MBFC axis; \vec{v}_s – current velocity vector in relation to the EBCS; v_{sx}, v_{sy}, v_{sz} – MBFC axis vector projections; superscript T denotes matrix transposition.

The matrix Λ is symmetric, that is, $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$. The coefficients λ_{ij} are called associated masses, the term, mass is used here in a general sense, and the coefficients λ_{ij} characterize inertia in general.

The elements of the matrix Λ depend exclusively on the geometry of the AUV outer (external) surface [66].

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

2.3.3. Гідродинамічні сили та моменти. Гідродинамічні (в'язкі) сили та моменти з'являються на корпусі АНПА внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем при його русі. Визначення цих сил є комплексним завданням гідромеханіки, для розв'язку якого застосовуються методи та засоби обчислювальної гідродинаміки та басейнових та морських натурних випробувань [1; 61]. Але при моделюванні АНПА користуються спрощеним представленням цих сил та моментів шляхом їх представлення у вигляді суми лінійної та квадратичної залежностей від швидкості руху АНПА по відношенню до водного середовища [63]:

$$T_h = [\vec{F}_h \quad \vec{M}_h]^T = D(V)V, \quad (2.12)$$

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

Гідродинамічні коефіцієнти, які містить матриця D , вважаються константними.

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

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

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

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

The AUV basic law of dynamics (2.1) receives the matrix of the resultant forces and moments T as input, and the AUV kinematic parameters are obtained at the output: velocity parameters in the form of matrix V and positional parameters in the form of matrix R .

2.3.3. Hydrodynamic forces and moments. Hydrodynamic (viscous) forces and moments appear on the AUV hull as a result of interaction with the environment during its movement. Determination of these forces is a complex problem of hydromechanics, for the solution of which the methods and means of computational hydrodynamics and basin and marine field tests are used [1; 62]. But when modeling AUV, they use a simplified representation of these forces and moments by representing them as a sum of linear and quadratic dependence on the speed of movement of the AUV in relation to the water environment [63]:

where D – resistance parameter matrix, \vec{F}_h – vector of hydrodynamic drag forces, V – AUV velocity matrix (translational and rotational) relative to water. \vec{M}_h – hydrodynamic drag torque (resistance moment).

Hydrodynamic coefficients, containing matrix D , are considered constant.

For a body completely immersed in water, we accept the following assumption [63]:

where: $a_{l,q}, b_{l,q}, c_{l,q}, p_{l,q}, q_{l,q}, r_{l,q}$ – AUV hydrodynamic resistance parameters; $v_{x,y,z}, \omega_{x,y,z}$ – projection, respectively, of AUV translational and rotational velocity vectors on MBFC axis.

Elements of matrix D are formed on the basis of water density, geometric dimensions of the AUV and hydrodynamic coefficients, which include: $k_{F_{x,y,z}}$ – hydrodynamic coefficients of drag forces with respect to the MBFC axes, $k_{M_{x,y,z}}$ – hydrodynamic coefficients of the moments of resistance with respect to the MBFC axes.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3.4. Forces and moments of gravity and buoyancy. AUV force of gravity is determined based on the acceleration of gravity:

where m – the AUV mass (without added water masses), g – acceleration of gravity, \vec{e} – unit vector pointing straight down.

The force of attraction does not create moments, therefore the matrix of forces and moments of attraction T_g has the following form:

The buoyancy force is determined on the basis of the water density ρ and the AUV volume Ω immersed in it:

The point of application of the buoyancy force usually does not coincide with the AUV center of mass, therefore the buoyancy force creates a moment:

where \vec{r}_b – radius vector connecting the center of mass of the AUV and the point of application of the buoyancy force.

The matrix of forces and moments of buoyancy T_b is formed on the basis of vector elements \vec{F}_b and \vec{M}_b :

When designing underwater equipment, the buoyancy block is positioned so that the application coordinates of the buoyancy force x_b and z_b are equal to zero. This will provide passive stabilization of the AUV's roll and pitch.

According to the principle of superposition, the sum of the matrices T_g and T_b forms the matrix T_{gb} , which takes into account the influence of the forces and moments of attraction and buoyancy on the AUV:

Vectors \vec{F}_g , \vec{F}_b and \vec{M}_b are specified in projections on the MBFC axis.

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

2.3.5. Математична модель рушійної частини РСК АНПА.

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

$$T_{PC} = [F_{ГГ} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \quad (2.20)$$

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

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

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

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

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

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

Underwater vehicles are designed with zero buoyancy, so the effects of gravity and buoyancy are manifested only by the moment of buoyancy.

2.3.5. Mathematical model of the AUV PSC propulsion part.

2.3.5.1. Propulsion force and moment. The work examines the AUV, which has one engine – screw-propeller of counter-rotary rotation, and the thrust of which is directed to the AUV center of mass along its associated x -axis. Therefore, the general matrix equation of forces and moments of this AUV PSC moving part [64] will have the form:

$$T_{PC} = [F_{ГГ} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \quad (2.20)$$

where: T_{PD} – matrix of forces and moments of the AUV propulsion device; F_p – the thrust that is created by a counter-rotary propeller.

Such a PSC does not create torques (control by rotating degrees of freedom is carried out using hydrodynamic rudders).

2.3.5.2. Mathematical model of the AUV PSC propulsion part drive system. The main components of the propulsive part of the PSC are an electric motor (EM), a gearbox and shafting (GS) and screw-propeller (SP). The experience of modeling such an AUV electromechanical system shows that, to simplify its mathematical model, it is possible to neglect the second-order variables, which include electromagnetic processes in EM, as well as friction forces in the shafting.

Then the EM as a source of mechanical energy for the propulsive part of the PSC can be simplified by the differential equation of the first order – the equation of motion of the drive with the gain K_{EM} :

$$J_p \frac{d\omega_{SP}}{dt} = K_{EM} u - Q_{SP} \quad (2.21)$$

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

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

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

де: u – керуючий сигнал регулятора ЕД; $\omega_{\Gamma\Gamma}$ – кутова швидкість обертання ГГ; J_p – сумарний момент інерції системи «ЕД – РВ – ГГ», приведений до ГГ; $Q_{\Gamma\Gamma}$ – гальмівний момент ГГ; $F_{\Gamma\Gamma}$ – упор ГГ; $K_Q(J)$ та $K_q(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують гальмівний момент гребного гвинта; $K_F(J)$ та $K_f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують упор гребного гвинта; J – відносний поступ ГГ; D – діаметр ГГ; ρ – густина води; v_p – проекція вектора швидкості переміщення рушійної частини РСК АНПА відносно води на вісь прямого ходу ГГ.

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

2.3.6. Керуючі сили і моменти хвостового оперення.

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

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

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

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

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

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

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

where: u – EM regulator control signal; ω_{SP} – the propeller angular velocity of rotation; J_p – is the total moment of inertia of the «EM – GS – propeller» system, modified to the propeller; Q_{SP} – the propeller braking torque; F_{SP} – propeller thrust; $K_Q(J)$ and $K_q(J^{-1})$ – dimensionless coefficients characterizing the propeller braking torque; $K_F(J)$ and $K_f(J^{-1})$ – dimensionless coefficients characterizing the propeller braking thrust; J – the propeller relative progress; D – propeller diameter; ρ – water density; v_p – projection of the AUV PSC moving part velocity vector relative to the water on the axis of the screw propeller forward stroke.

Coefficients K_Q , K_q , K_F , K_f are nonlinear and are determined depending on the parameters of J , ω_{SP} and v_{SP} [71].

2.3.6. Control forces and moments of tail fin.

2.3.6.1. Mathematical model of a hydrodynamic wing. The AUV is equipped with a tail fin (vertical and horizontal rudder), the elements of which can be modeled as hydrodynamic wings (HW). Modeling the HW influence is reduced to taking into account its lifting force and the force of frontal drag [71].

To simulate the HW influence on the AUV, the coordinate system $O_w x_w y_w z_w$, connected with the HW is introduced, its base is denoted by letter W . Its abscissa axis is directed in the HW frontal resistance direction, the ordinate axis is directed in the HW lifting force direction, the applicate axis forms a rectangular coordinate system with the first two coordinates.

The HW forces are determined in the HW coordinate system (in the W basis):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3.7. Імітаційна модель АНПА.

2.3.7.1. Структура моделі АНПА. Структуру імітаційної моделі розробимо з урахуванням особливостей взаємодії елементів АНПА шляхом з'єднання входів та виходів

where: \vec{F}_w – force vector which creates HW; \vec{v}_w – HW motion velocity vector in relation to water; $C_{x,y}$ – hydrodynamic coefficients of resistance and HW lift force, respectively; α – HW angle of attack; S – HW area.

The torque that occurs on the AUV hull under the action of HW is determined by the formula

where \vec{r}_w – radius vector connecting the AUV center of mass and the point of application of the HW resultant force.

The hydrodynamic coefficients $C_{x,y}$ depend on the angle of attack α , are determined by model tests in research basins, are nonlinear, and are given in the reference literature for typical wing profiles [71].

The HW motion speed relative to water depends on the AUV translational \vec{v} and rotational $\vec{\omega}$ speeds:

When AUV rotates, the flow velocity around the HW for different points of the HW will differ, since they are at different distances from the AUV center of mass. But, if the HW chord is much less than the distance between HW and the AUV center of mass, then their speeds can be assumed to be the same.

The HW mathematical model is used to simulate the AUV aft tail. The forces and moments of the hydrodynamic wings installed on the AUV are converted into MBFC, after which they can be used to form the corresponding matrices for substitution into the basic law of the AUV dynamics.

2.3.7. AUV simulation model

2.3.7.1. AUV model structure. The simulation model structure will be developed taking into account the interaction peculiarities of the AUV elements by connecting the inputs

модулів, які моделюють окремі елементи складових АНПА (рис. 2.1) [72].

Математична модель складається з моделі основного закону динаміки АНПА та математичних моделей гідродинамічних впливів (ГДВ), математичних моделей хвостового оперення (ХО) у складі вертикального і горизонтального стерен, та рушійного пристрою, які утворюють математичну модель рушійно-стернового комплексу (РСК), моделі впливу сил тяжіння та плавучості (СТП).

Керуючим впливом для АНПА є вектор-рядок \vec{u} , чий сигнали надходять на вхід моделі рушійно-стернового комплексу (РСК) і задають величину рушійної сили та кути повороту ХО, що викликає рух АНПА в просторі.

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

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

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

Всі елементи цих матриць задаються в проєкціях на осі ЗСК.

and outputs of the modules that simulate the individual elements of the AUV components (Fig. 2.1) [72].

The mathematical model of the AUV consists of the basic law of dynamics and mathematical models of hydrodynamic effects (HDE), tail fin (TF) and a propulsion steering complex (PSC), the influence of gravity and buoyancy forces (GBF).

The control action for the AUV is a row vector that enters the propulsion and steering complex (PSC) model input and the magnitude of the driving force and the angles of rotation of the TF elements, thereby allowing the AUV controlled movement in space.

Elements of the matrix of forces and moments T , that is, vectors \vec{F} and \vec{M} , are formed according to the superposition principle [73]:

where: T_h – matrix of hydrodynamic (viscous) forces and moments; T_{gb} – matrix of forces and moments of gravitation (attraction) and buoyancy; T_{tail} – TF forces and moments matrix; T_p – the PD forces matrix (and for general moment case).

All elements of these matrices are specified in projections on the MBFC axis.

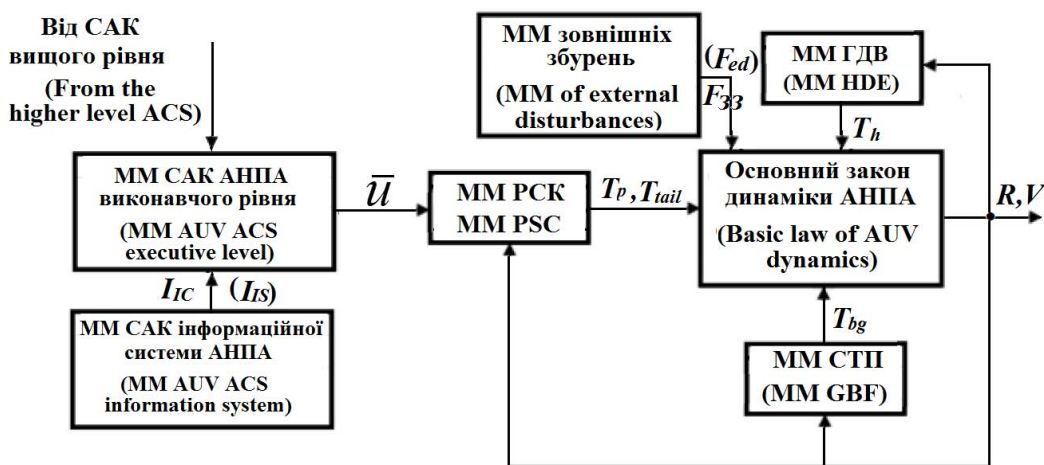


Рисунок 2.1 – Функціональна схема математичної моделі АНПА
Figure 2.1 – Functional diagram of the AUV mathematical model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для повороту стерна застосовується швидкодіючий автоматизований електропривод, динамічні характеристик якого значно вищі від динамічних характеристик ЗК АНПА як твердого тіла у потоці води. Тому перехідними процесами у такому електроприводі можна знехтувати, що дає можливість прийняти його математичну модель у вигляді:

$$\alpha_{h,v} = K u_{h,v},$$

2.3.7.2. AUV «Scanner» TF forces and moments. The AUV hull has a shape close to a triaxial ellipsoid and is equipped with two horizontal control wings of the tail unit (TF). The horizontal and vertical control rudders (CR), which are TF elements, are located in the aft part of the AUV, which makes it possible to create controlled yaw and pitch moments.

In connection with the chosen AUV hydrodynamics configuration, the TF force and moment matrices will have the following form:

where: T_h, T_v – matrices of forces and moments of the horizontal and vertical rudder, respectively; $F_{hx}, F_{hy}, F_{hz}, M_{hx}, M_{hy}, M_{hz}$ – the projections of the force and moment vectors of the horizontal rudder, respectively; $F_{vx}, F_{vy}, F_{vz}, M_{vx}, M_{vy}, M_{vz}$ – the projections of the force and moment vectors of the vertical rudder, respectively; $F_{tail(x)}, F_{tail(y)}, F_{tail(z)}, M_{tail(x)}, M_{tail(y)}, M_{tail(z)}$ – projections of the force and moment vectors of TF on the MBFC axis, respectively.

2.3.7.3. Mathematical model of the AUV TF control system. The control action for the AUV «Scanner» project is the row vector \bar{u} :

where: u_F – driving (propulsion) device control signal; u_h – horizontal ruder rotation drive control signal; u_v – vertical ruder rotation drive control signal.

To turn the steering wheel, a high-speed automated electric drive is used, the dynamic characteristics of which are much higher than the dynamic characteristics of the AUV EH as a rigid body in the water flow. Therefore, transient processes in such an electric drive can be neglected, which makes it possible to accept its mathematics model in the form:

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

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

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

where: $\alpha_{h,v}$ – the rotation angles of horizontal and vertical rudder relative to the AUV hull, respectively; K – steering rudder electric drive gain; $u_{h,v}$ – intensity sensor outputs for horizontal and vertical rudder, respectively.

With negative values of $u_{h,v}$, angles $\alpha_{h,v}$ have positive values, which will create a trim on the nose of the AUV and make it go deeper and yaw to starboard and make it turn to the right. With positive values of the control actions, the AUV will receive stern aft pitch and will float and yaw on the left side and will turn left.

This coefficient K sign choice is made so that the control action sign corresponds to the acceleration sign behind the AUV controlled rotational degrees of freedom.

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

2.4. Mathematical modeling of the controlled motion of a single AUV as a group "agent"

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

Для другого напрямку C_{Gr} автоматизації Co-Co-Ro-технологій значну актуальність представляють:

- автоматизація процесів групового руху АНПА при виконанні пошукових робіт (головне зпризначення групи АНПА);
- автоматизація керування окремими видами морських пошукових операцій, до яких, у першу чергу, віднесемо керування роботою морського безкіпажного комплексу (МБК), що реалізує базову технологію виконання морських підводних місій пошукового характеру.

Розглянемо особливості математичного моделювання наведених задач автоматизації.

Based on the AUV group application automation main tasks, formulated in section 1, for the first direction C_{Ag} of Co-Co-Ro-technologies automation, the actual task is the automatic motion control of single AUV as a group «agent» in conditions of navigational proximity of other AUVs.

For the second direction C_{Gr} of Co-Co-Ro-technologies automation, the following are of great relevance:

- automation of AUV group motion processes during search operations (the main purpose of the AUV group);
- control automation of certain types of marine search operations, which, first of all, includes the control of the marine unmanned complex (MUC) operations, which implements the basic technology of marine underwater search missions execution.

Consider the features of mathematical modeling of these automation tasks.

2.4.1. Modeling of motion control processes of a single AUV as a group «agent»

2.4.1. Моделювання процесів керування рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА. Зазначимо, що питання математичного моделювання групового руху АНПА постійно знаходяться у центрі уваги дослідників. Так, у роботі [74] наводяться рівняння руху суден та підводних апаратів у вигляді стандартних гідродинамічних моделей.

У роботі [75] описано комп'ютерний тренажер, розроблений для пришвидшення синтезу та перевірки працездатності САК АНПА. Однак, в зазначених роботах особливості організації безаварійного руху групи АНПА не розглядаються.

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

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

Європейський проект MORPH пропонує концепцію підводної роботизованої системи, яка виникає з інтеграції різних мобільних робототехнічних модулів з додатковими ресурсами [78]. Кожним вузлом блоків (набір невеликих і дешевих роботизованих морських апаратів) MORPH є АНПА, який здатний виконувати деякі завдання з наперед заданого переліку. Однак, вказані публікації мають інформаційно-довідковий характер і не дають уявлення про науково-технічні рішення щодо САК.

Найбільш повно питання комп'ютерного дослідження групового руху АНПА розглянуто у [79]. Автори сформулювали головні задачі створення спеціалізованого

in conditions of navigational proximity of other AUVs. Note that the issues of the mathematical modeling of AUV group motion are constantly in the center of attention of researchers. Thus, in [74] the equations of motion of ships and underwater vehicles in the form of standard hydrodynamic models are given.

Thus, article [75] describes a computer simulator specially designed to accelerate the synthesis and verify the performance of AUV ACS. However, in the specified robots, the features of organizing an accident-free movement of the AUV group are not considered.

In order to develop a high-precision AUV simulation system for testing for guidance, navigation and control algorithms, a general mathematical model of AUV dynamics was developed, which includes interdisciplinary study of kinematics, hydrostatics and hydrodynamics in [76]. However, the author does not analyze the features of AUV motion modeling in difficult navigation conditions (the presence of static and dynamic obstacles, etc.).

In [77], an AUV group ACS was proposed, taking into account the limitations of communication in the underwater environment. A feature of the system is the ability to share the computing resources of a group by all its vehicles.

The European MORPH project proposes the concept of an underwater robotic system that arises from the integration of various mobile robotic modules with additional resources [78]. Each node of the blocks (a set of small and cheap robotic marine vehicles) of MORPH is an AUV, which is capable of performing some tasks from a predetermined list. However, these publications should be of informational and reference nature and do not give an idea of scientific and technical solutions for ACS.

The most complete issues of computer study of the AUV group motion are considered in [79]. The authors formulated the main tasks of creating a specialized modeling

моделюючого комплексу для дослідження системи автоматичного керування одиночним АНПА і групою АНПА в умовах нестационарності власних параметрів підводного апарата й невизначеності зовнішніх збурювань. та запропонували багаторівневу структуру такого комплексу. Однак, питання моделювання безпечного групового руху АНПА автори залишили поза увагою.

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

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

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

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

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

complex for studying the automatic control system for a single AUV and a group of AUVs in the conditions of nonstationarity of the underwater vehicle's own parameters and uncertainty of external disturbances and proposed a multilevel structure of such a complex. However, the authors ignored the issue of AUV group safe motion modeling.

Therefore, the mathematical model and structure of the automatic motion control system of a single AUV as a group «agent» in conditions of navigational proximity of other AUVs, which is intended for study the effectiveness of the laws of safe AUV motion when performing underwater search missions is proposed below in the paper [80].

2.4.2. Development of the fuzzy automatic control system structure for a single AUV as a group «agent». During group motion, it is necessary that each AUV keeps a safe distance from the neighboring vehicles in a given distance range, when the minimum distance between them does not pose an emergency collision risk (adhesion mode), and the maximum distance ensures the group preservation and does not threaten the single vehicle departure from the sensor view of other group members (cohesion, segregation mode) [81].

In addition, after the maneuvering completion and ensuring the specified distance, the AUV must take a pre-set or specified course (alignment (leveling) mode).

The use of fuzzy logic provides an approach to the synthesis of the necessary control system (fuzzy control), and guarantees the possibility of solving a wide range of problems in which the data, goals and constraints are too complex or vaguely defined and therefore cannot be accurately described mathematically [82].

Fuzzy control refers to a control strategy based on empirically acquired knowledge about the functioning of an object (process), presented in linguistic form in the form of some set of rules.

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

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

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

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

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

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

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

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

Для узгодження роботи «агентів», що виконують спільну місію, пропонується

It is known that the generalized procedure for the synthesis of a fuzzy automatic control system can be represented by the following stages [82]:

- determination of the set of goals that are set for the control system;
- specifying the sets of input and output variables of the controller;
- listing possible situations in the system operation;
- forming a base of rules;
- choosing the fuzzification methods;
- choice of inference mechanism and defuzzification methods.

When controlling the maneuvering motion of an AUV, especially if it operates in a group that performs a joint mission, application of classical control methods will not ensure the adequate level of accuracy.

It is also necessary to consider the substantial non-linearity of the parameters to be controlled. The application of fuzzy logic allows solving a number of problems without applying the classical linearization.

A linear continuous PD controller $y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ can be replaced by a fuzzy controller that is close in strategy and control logic, if the value of the control action $y(t)$ is considered as its output variable $y(k) = K_p \varepsilon(k) + K_d \Delta \varepsilon(k)$.

Thus, for the input variables $\varepsilon(t)$, $\Delta \varepsilon(t)$ and the output variable $y(t)$, a fuzzy controller can be synthesized; it would implement the nonlinear law $y(t) = F[\varepsilon(t), \Delta \varepsilon(t)]$ and would be equivalent to a PD controller.

Therefore, the mathematical model development for the study of AUV maneuvering motion, implemented on the principles of fuzzy logic AUV, is currently a very important task.

One of the main tasks of AUV group control is to ensure the mode of coordinated motion of vehicles on a predetermined trajectory or route. It is important to maintain the adhesion and cohesion modes [81].

To coordinate the work of «agents» performing a joint mission, a control system

система керування, яка має наступну структуру [80] (див. рис. 2.2).

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

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

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

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

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

Для вирішення поставленої задачі застосовуються нечіткі регулятори. Регулятори дистанції та курсу є нечіткими ПД-регуляторами типу Мамдані з дефазифікацією керуючої змінної за методом центра ваги.

is proposed, which has the following structure [80] (see Fig. 2.2).

This system consists of two main regulators: a regulator that controls the distance between agents, and a course regulator. In the stable mode, a single AUV moves at the course ψ_g and speed v_x set for the group.

If one of the neighboring vehicles changes its course and starts moving away or approaching another «agent», the sensors of our vehicle record the change in motion conditions and its controllers produce a new, temporary, motion trajectory.

The distance sensors block of our AUV forms a set of distances to the nearest target $d_s = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]$. The distance to the target is determined by the expression:

where $d_{\min 1}$, $d_{\min 2}$ – indicators of a pair of distance sensors, the difference between the values of which is minimal, m ; $i = 1..3$.

Fuzzy regulators are used to solve this problem. The distance and course controllers are fuzzy Mamdani-type *PD* controllers with center-weighted control variable defuzzification.

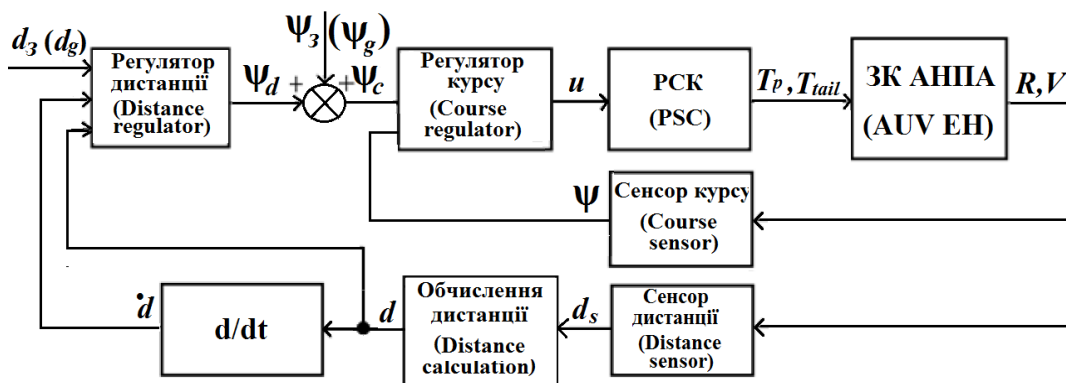


Рисунок 2.2 – Структурна схема САК рухом одиночного АНПА як «агента» групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА

Figure 2.2 – Block diagram of the ACS motion of a single AUV as a group "agent" under the conditions of navigational proximity of other AUVs

Вхідними параметрами для регулятора дистанції є відхилення $\varepsilon_d = d_3 - d$ і похідна відхилення $\dot{\varepsilon}_d$, обчислена за методикою [83], яка передбачає фільтрацію сигналів, що отримуються.

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

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

Виходом регулятора є відхилення ψ_d від заданого курсу ψ_3 , яке представлено наступними термами: негативна (N), нульова (Z), позитивна (P) рис. 2.5.

База правил нечіткого регулятора зведено до табл. 2.1.

The input parameters for the distance regulator are the deviation $\varepsilon_d = d_3 - d$ and the derivative deviation $\dot{\varepsilon}_d$, calculated according to the method [83], which involves filtering the received signals.

The variable ε_d is represented by the following linguistic terms: object loss (Out Of Range), object distance (Miss), consistent motion (Track), object approach (Danger).

The variable $\dot{\varepsilon}_d$ is represented by the following terms: negative large (NL), negative small (NS), zero (Z), positive small (PS), positive large (PL) Fig. 2.4.

The output of the regulator is a deviation ψ_d from the set course ψ_3 , which is represented by the following terms: negative (N), zero (Z), positive (P) Fig. 2.5.

The rules base of the regulator is presented in Table 2.1.

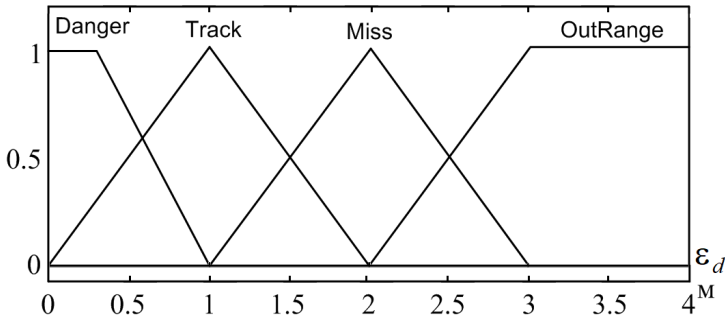


Рисунок 2.3 – Функція належності змінної ε_d
 Figure 2.3 – Variable membership function ε_d

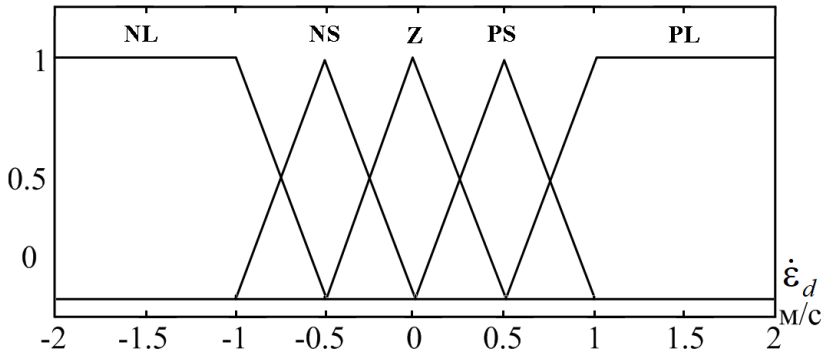


Рисунок 2.4 – Функція належності змінної $\dot{\varepsilon}_d$
 Figure 2.4 – Variable membership function $\dot{\varepsilon}_d$

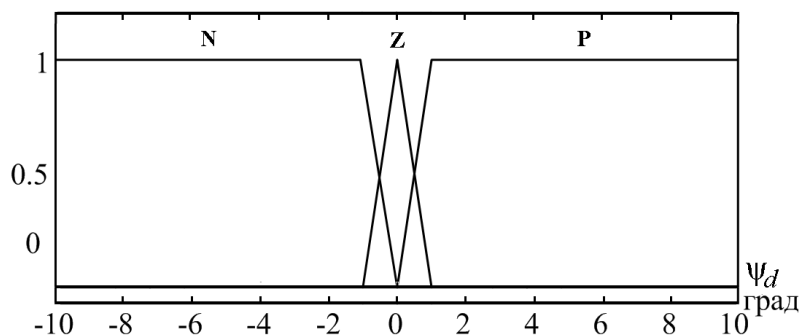


Рисунок 2.5 – Функція належності вихідної змінної ψ_d
 Figure 2.5 – Membership function of the output variable ψ_d

Таблиця 2.1 – База правил регулятора дистанції
 Table 2.1 – The rules of base of the distance regulator

ϵ_d \ ϵ_d	Danger	Track	Miss	Out of Range
NL	N	N	Z	Z
NS	N	Z	P	Z
Z	N	Z	P	Z
PS	N	Z	P	Z
PL	Z	Z	P	Z

Нечітка поверхня регулятора дистанції представлена на рис 2.6.

The fuzzy surface of the distance regulator is shown in Fig. 2.6.

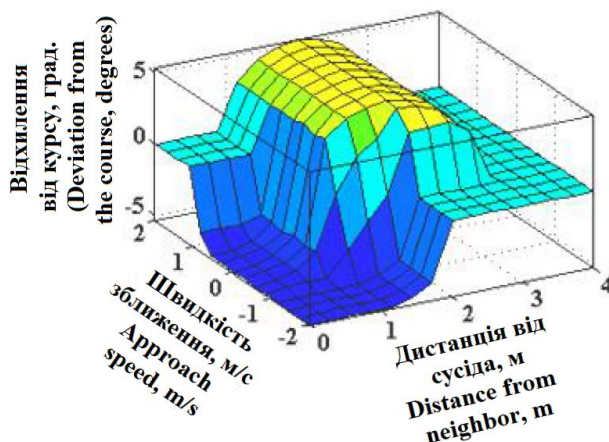


Рисунок 2.6 – Поверхня нечіткого виходу регулятора дистанції
 Figure 2.6 – The fuzzy output surface of the distance controller

Регулятор курсу, в свою чергу, отримує на вході сигнал керування ψ_c та сигнал ψ від сенсора курсу.

При цьому, регулятор дистанції контролює наближення або віддалення АНПА-сусіда з заданою точністю керування (в даному випадку 0,5 м.), а регулятор курсу формує нову траєкторію руху для власного АНПА.

Сигнал, що надходить від регулятора дистанції, визначається наступними термами: (OB) – від’ємний великий кут (об’єкт віддаляється стрімко, на велику відстань); (OM) – від’ємний малий кут (об’єкт поступово віддаляється); (Track) – об’єкт рухається у межах заданої траєкторії; (PM) – додатний малий кут; (PB) – додатний великий кут, рис. 2.7.

Наступним кроком даний сигнал порівнюється із сигналом від сенсора курсу, який в свою чергу, визначає похибку від найближчого АНПА-сусіда та кут переладки стерна АНПА, рис. 2.8.

На виході маємо вектор, який визначає напругу, що подається на гребний двигун РСК АНПА (визначає швидкість руху апарату), та кут повороту стерна, що дає змогу формувати нову траєкторію руху, рис. 2.9.

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

The course controller, in turn, receives a control signal ψ_c and a signal ψ from the course sensor at the input.

At the same time, the distance controller controls the approach or departure of the neighbor AUV with a given control accuracy (in this case, 0.5 m), and the course controller forms a new movement trajectory for its own AUV.

The signal coming from the distance controller is determined by the following terms: (NL) – negative large angle (the object moves away rapidly, over a long distance; NS) – negative small angle (the object gradually moves away); Track) – the object moves within a given trajectory, (PS) – positive small angle, (PL) – positive large angle, Fig. 2.7.

The next step is compare this signal with the signal from the course sensor, which, in turn, determines the error between the nearest agent and the AUV steering nozzle rotation angle (see Fig. 2.8).

At the output, there is a vector that determines the voltage applied to the AUV PSC propulsion motor (determines the vehicle’s speed) and the steering angle, which allows the formation of a new motion trajectory, Fig. 2.9.

Let us simulate the situation in the mode of adhesion, when the control actions generated by the ACS will be aimed at increasing the distance to the neighboring AUV.

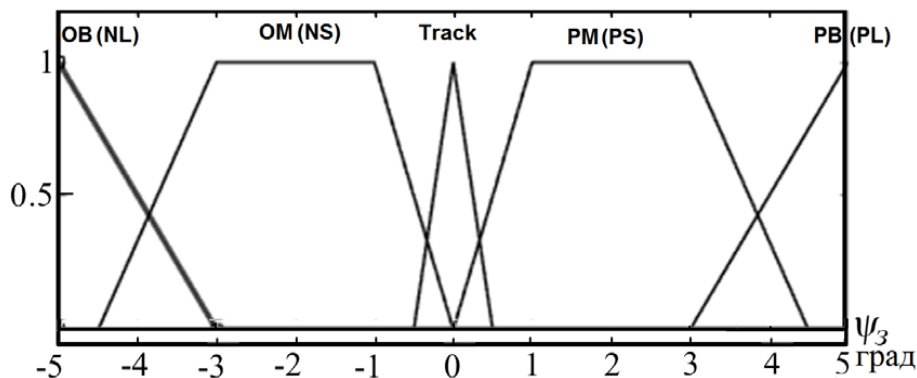


Рисунок 2.7 – Терми сигналу «кут відхилення»

Figure 2.7 – Terms of the “deviation angle” signal

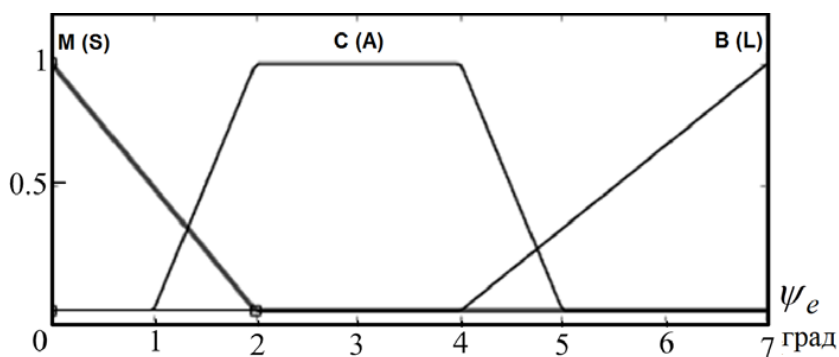


Рисунок 2.8 – Терми похибки регулювання
 Figure 2.8 – Terms of adjustment error

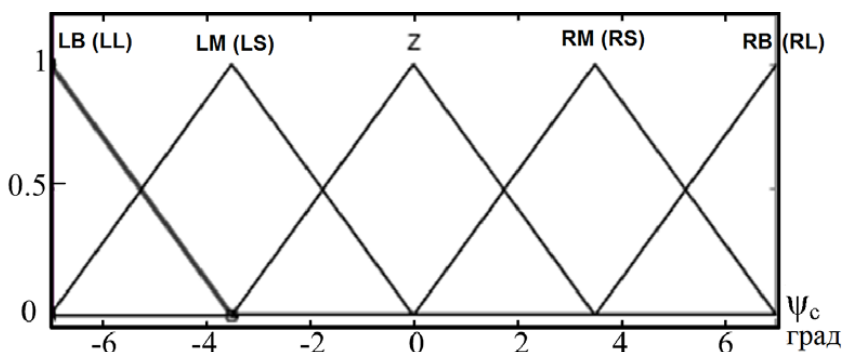


Рисунок 2.9 – Визначення вихідного керуючого сигналу
 Figure 2.9 – Determination of the output control signal

Таблиця 2.2 – База правил регулятора курсу
 Table 2.2 – The rules base of the course regulator

$\frac{\epsilon_d}{\dot{\epsilon}_d}$	OB (NL)	OM(NS)	Track	PM(PS)	PB(PL)
M (мале) {S (small)}	RM(RS)	RM(RS)	Z	LM(LS)	LM(LS)
C (середнє) {A (average)}	RB(RL)	RM(RS)	Z	LM(LS)	LB(LL)
B (велике) {B (big)}	RB(RL)	RB(RL)	Z	LB(LL)	LB(LL)

База правил нечіткого регулятора курсу зведена до таблиці 2.2 (R – вправо, Z – нуль, L – вліво), а поверхня нечіткого виводу показана на рис. 2.10.

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

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

The rules base of the fuzzy course controller is summarized in Table 2.2 (R – to the right, Z – zero, L – to the left), and the surface of the fuzzy output is shown in Fig. 2.10.

At the output, the course controller forms a control signal u for the AUV PSC.

Mathematical modeling of the developed control system was performed in the Simulink system of the MATLAB environment.

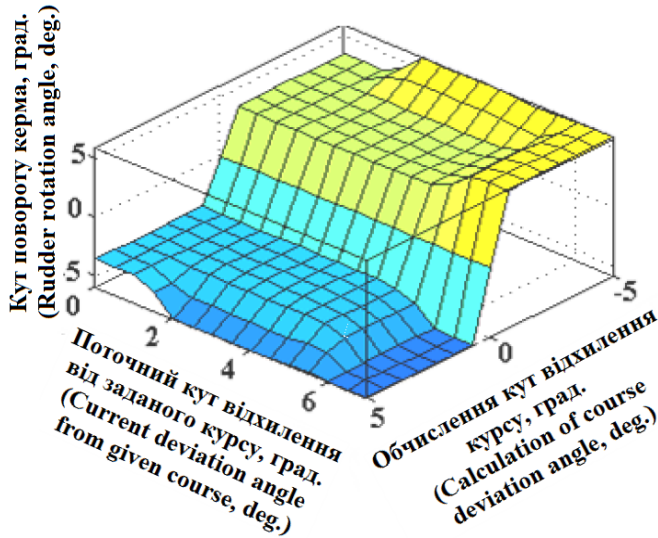


Рисунок 2.10 – Поверхня нечіткого виходу регулятора курсу
 Figure 2.10 – The fuzzy output surface of the distance controller

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

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

In Fig. 2.11 the block diagram of the ACS, which allows studying the operation of own AUV in conjunction with the AUV-neighbor, which has deviated from the given course, is presented.

The developed mathematical model allows keeping the control object at some distance from the installed AUV-neighbor.

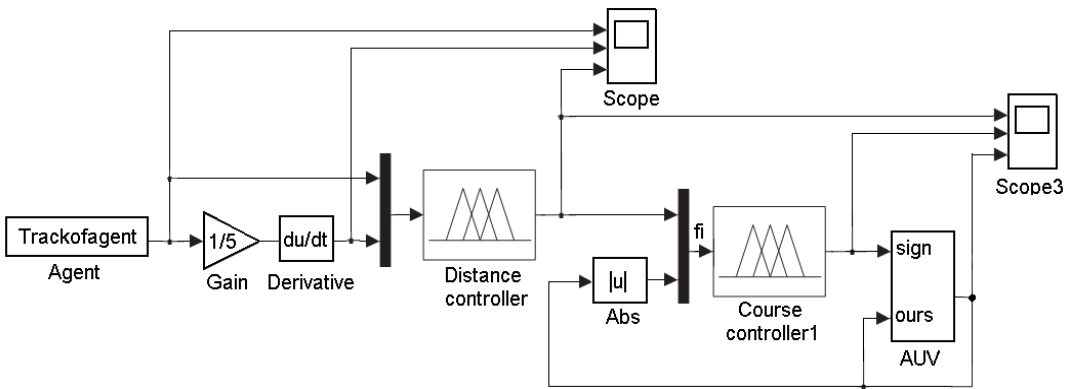


Рисунок 2.11 – Структурна схема САК АНПА, реалізована в системі Simulink
 Figure 2.11 – Structural diagram of the AUV ACS implemented in the Simulink system

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

In Fig. 2.12, graphs of the transition process (upper curve – distance, lower curve – control action) are presented.

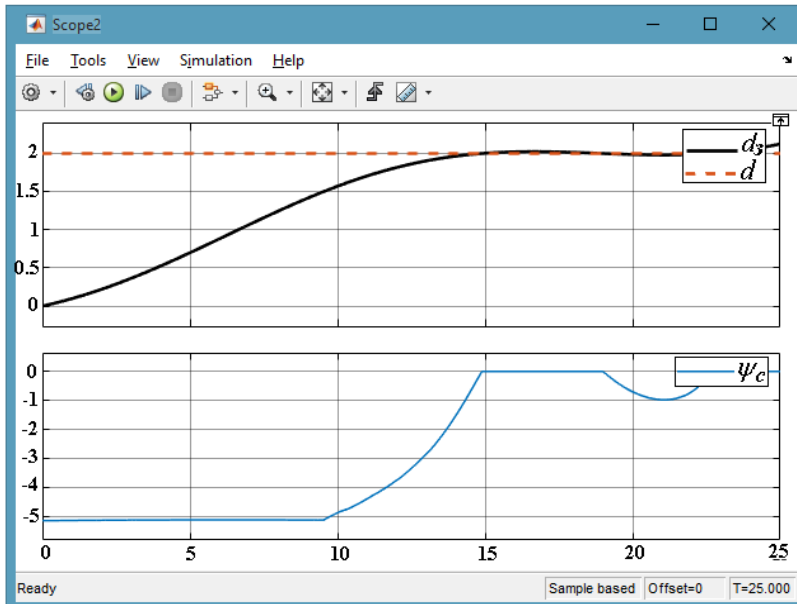


Рисунок 2.12 – Графіки перехідного процесу в режимі адгезії
Figure 2.12 – Graphs of the transition process in the adhesion mode

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

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

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

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

The Mathematical modeling of the distance controller operation on fuzzy logic in the adhesion mode. In this case, the overshoot is almost zero. This is due to the absence of external perturbation. The control action (steering effect) looks smoother, since there is no need to steer to keep the vehicle on a given trajectory.

The situation in cohesion is simulated, that is, the control actions generated by the ACS will be aimed at reducing the distance to the object (neighbor). In Fig. 2.13 presents graphs of the transition process (upper curve – distance, lower curve – control action).

The effectiveness of the controller for the case when a given object (for example, another AUV) will move along a sinusoidal trajectory and the controlled AUV will keep from it at a set distance is checked (see Fig. 2.14 (distance – upper curve; control action – lower curve)).

The combination of these signals forms a control effect on the PSC, which changes the AUV motion trajectory.

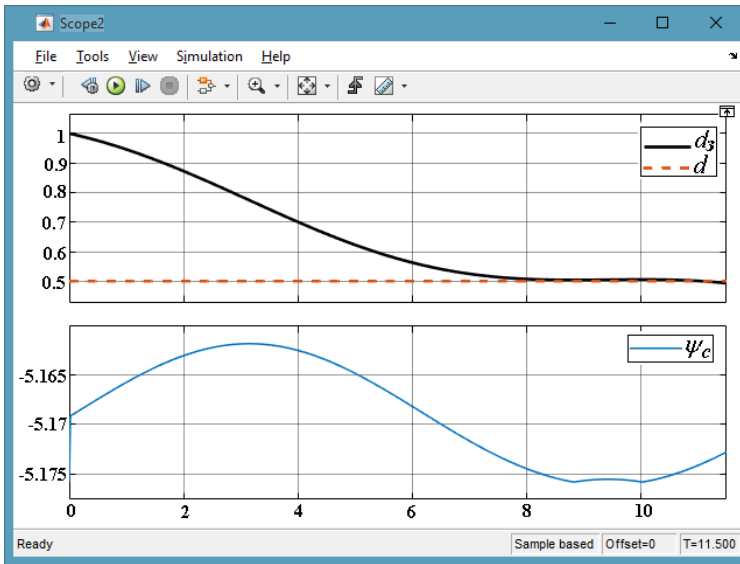


Рисунок 2.13 – Графіки перехідного процесу в режимі когезії
Figure 2.13 – Graphs of the transition process in the cohesion mode

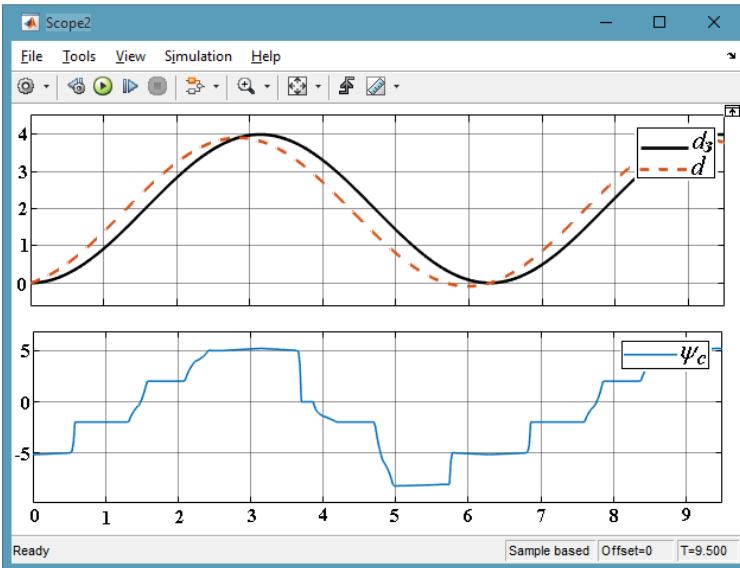


Рисунок 2.14 – Графіки перехідних процесів при гармонійному сигналі керування
Figure 2.14 – Graphs of transients with a harmonic control signal

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

Таким чином, отримана математична модель та її комп'ютерна реалізація можуть бути використані як складова спеціалізо-

As can be seen from the simulation results, the vehicle changes the motion trajectory when the agent working with it in pairs violates the set range of deviation.

Thus, the obtained mathematical model and its computer implementation can be used as

ваного моделюючого комплексу при дослідженні ефективності САК рухом одиночного АНПА як «агента» у складі групи в умовах навігаційної близькості інших АНПА.

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

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

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

На таких АНПА встановлюються відповідні гідроакустичні пінгери (прилади запиту-відповіді), які випромінюють імпульси при русі, що дає можливість обчислювати місцезнаходження апарата (координати у підводному просторі). Використовуючи РГАБ, АНПА-1 може одержати точну позицію по GNSS-сигналах, не піднімаючись на поверхню, щоб періодично калібрувати своє положення.

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

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

component of a specialized modeling complex in the study of the effectiveness of motion ACS of a single AUV as a group “agent” in conditions of navigational proximity of other group AUVs.

2.4.2. Modeling of the AUV group motion during search operations. The effectiveness of the AUV joint operation in the group significantly depends on the accuracy of solving the problem of navigation and localization of the AUVs in the group. Hydroacoustic navigation systems (HANS) with a long, short or ultra-short base are used. It gives the chance to define long-range and angular parameters of AUV.

Often to increase the mobility of the navigation complex using networks of sonar beacons moving on the sea surface and determine their location using a satellite navigation system (GNSS – Global Navigation Satellite System) [84].

In Fig. 2.15 shows a group of heterogeneous AUV, where one central (leader) AUV with the help of radio hydroacoustic buoys (RHAB), (radio-sonobuoy (RSB)) provides GNSS-information cheaper AUV, which are equipped with the simplest navigation sensors. Buoys of domestic production can be used as RSB [85].

Appropriate hydroacoustic pingers (request-response devices) are installed on such AUVs, which emit pulses during movement, which makes it possible to calculate the location of the device (coordinates in underwater space).

Using the RHAB, the AUV-1 leader can obtain an accurate position on GNSS signals without rising to the surface to periodically calibrate its position.

Other AUVs (followers) can obtain information about their exact position through sonar communication with the central AUV.

Often, instead of RHAB, a bottom sonar navigation system is used, which includes a network of bottom hydroacoustic beacons (BHB), the geographical coordinates of which are known in advance (see Fig. 2.16).

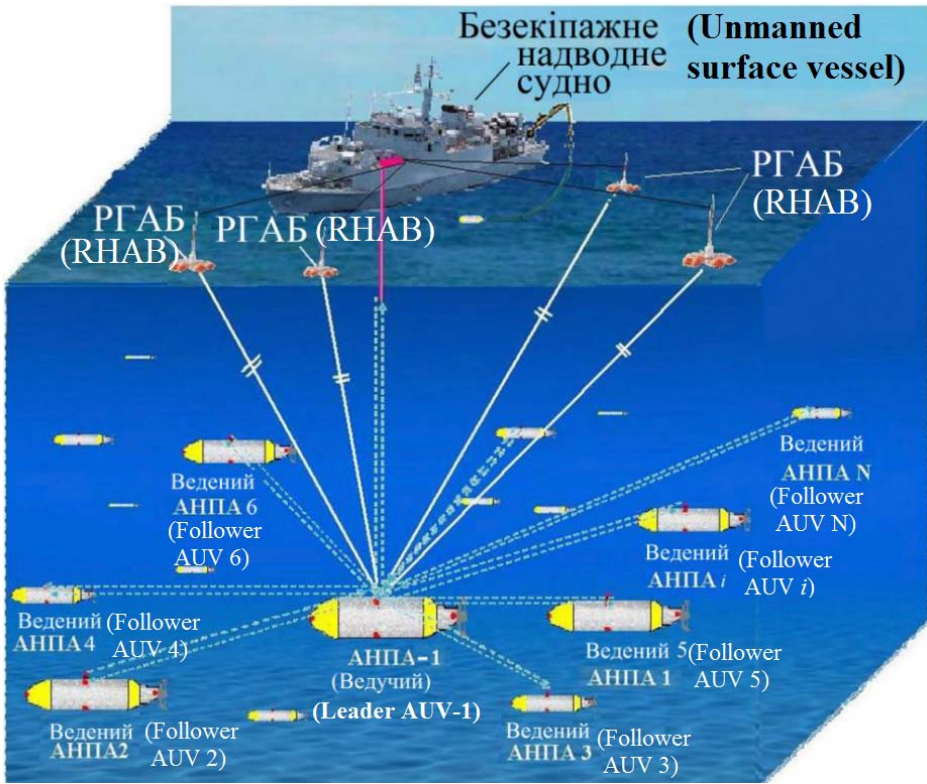


Рисунок 2.15 – Типове просторове розташування групи АНПА
 Figure 2.15 – Typical spatial location of the AUV group

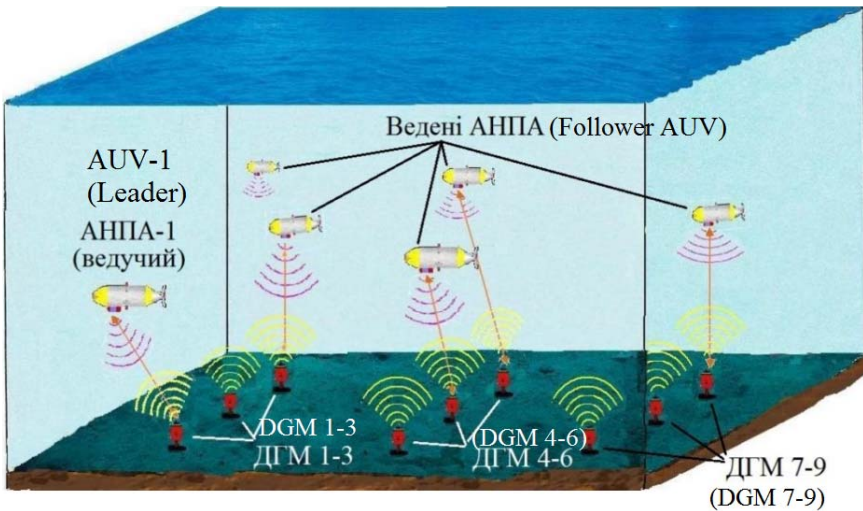


Рисунок 2.16 – Схема використання системи донної гідроакустичної навігації для групи АНПА
 Figure 2.16 – Diagram of the use of the bottom hydroacoustic navigation system for the AUV group

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

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

- виконавчому рівні E , де в автоматичному режимі має перевірятись функціонування одиночного АНПА як об'єкта керування; очевидно, що цей рівень притаманний як ведучому АНПА-1, так і кожному з ведених АНПА;

- базовому рівні B автоматизації (задача L_{Ag} згідно (1.1)) для перевірки ефективності системи автоматичного керування рухом одиночного АНПА в умовах навігаційної близькості інших підводних апаратів його групи;

- локальному рівні L групового керування АНПА (задача B_{Gr} згідно (1.2)), на якому виконується аналітична та алгоритмічна підготовка та подальше автоматичне виконання, власне, підводної пошукової операції;

- глобальному рівні G автоматизації підводних пошукових технологій (задача L_{Gr} згідно (1.2)), де має виконуватись планування та виконання морської пошукової операції з використанням групи АНПА, що має підвищити продуктивність пошукових операцій на віддалених акваторіях.

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

Розглянемо зміст на особливості функціонування вказаної структури.

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

Зазвичай, ці процеси містять формування масивів даних про гідрологію A_{Hi} i -ї робочої

Then the coordinates of the AUV are easily calculated based on the analysis of the delay of the signals from the DGM.

Based on the tasks of the work, mathematical modeling of the automatic control processes of the AUV group coordinated motion consisting of one leader and $N-1$ follower AUVs should be carried out at four hierarchical levels:

- executive level E , where the functioning of a single AUV as a control object should be checked in automatic mode; it is obvious that this level is inherent in both the leader AUV-1 and each of the group follower AUVs;

- basic level B automation (task L_{Ag} according to (1.1)), where it will be possible to test the effectiveness of the automatic motion control system of a single AUV in terms of navigational proximity of other submarines of its group;

- local level L of the AUV group control (task B_{Gr} according to (1.2)), at which analytical and algorithmic preparation and further automatic execution of, in fact, underwater search operation is performed;

- global level G of underwater search technology automation (L_{Gr} task according to (1.2)), where the planning and execution of a marine search operation should be performed using the AUV group, which should increase the productivity of underwater search operations in remote water areas.

The generalized structure of the modeling complex for studying the effectiveness of the automatic control system of the AUV group performing an underwater search mission is shown in Fig. 2.17.

Let's consider the content on the specified structure functional peculiarities.

The mathematical model MM-1 of remote control station of the AUV group reflects the processes involving human operators to generate a set M_{UM} of underwater missions $M_{UMi} \subset M_{UM}$ for a specific group of follower AUVs, which they must perform under the control of the leader AUV-1.

Typically, these processes include the formation of datasets on the hydrology A_{Hi}

акваторії та гідрологію A_{wi} акваторії переходу до неї від місця випуску групи автономних ненаселених підводних апаратів, про характеристики об'єктів пошуку Z_{wij} , розташованих на цих акваторіях, та про вимоги щодо обстеження і документування R_{wij} :

of the i -th working water and the hydrology A_{wi} of the water of the transition to it from the place of release of the AUV group, the characteristics of search objects Z_{wij} located in these waters and the requirements for survey and documentation of R_{wij} :

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

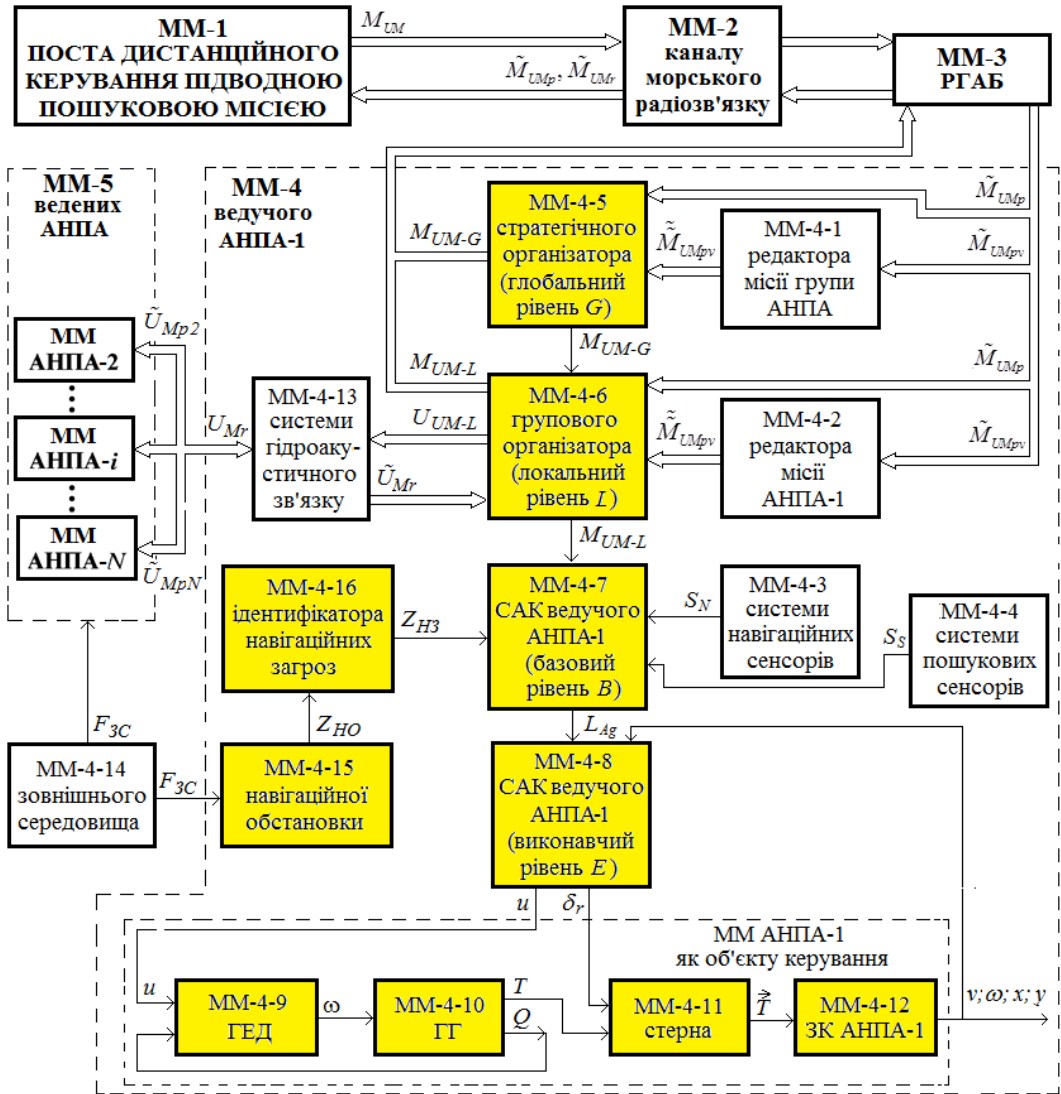


Рисунок 2.17 – Узагальнена структура моделюючого комплексу для дослідження ефективності системи автоматичного керування групою АНПА

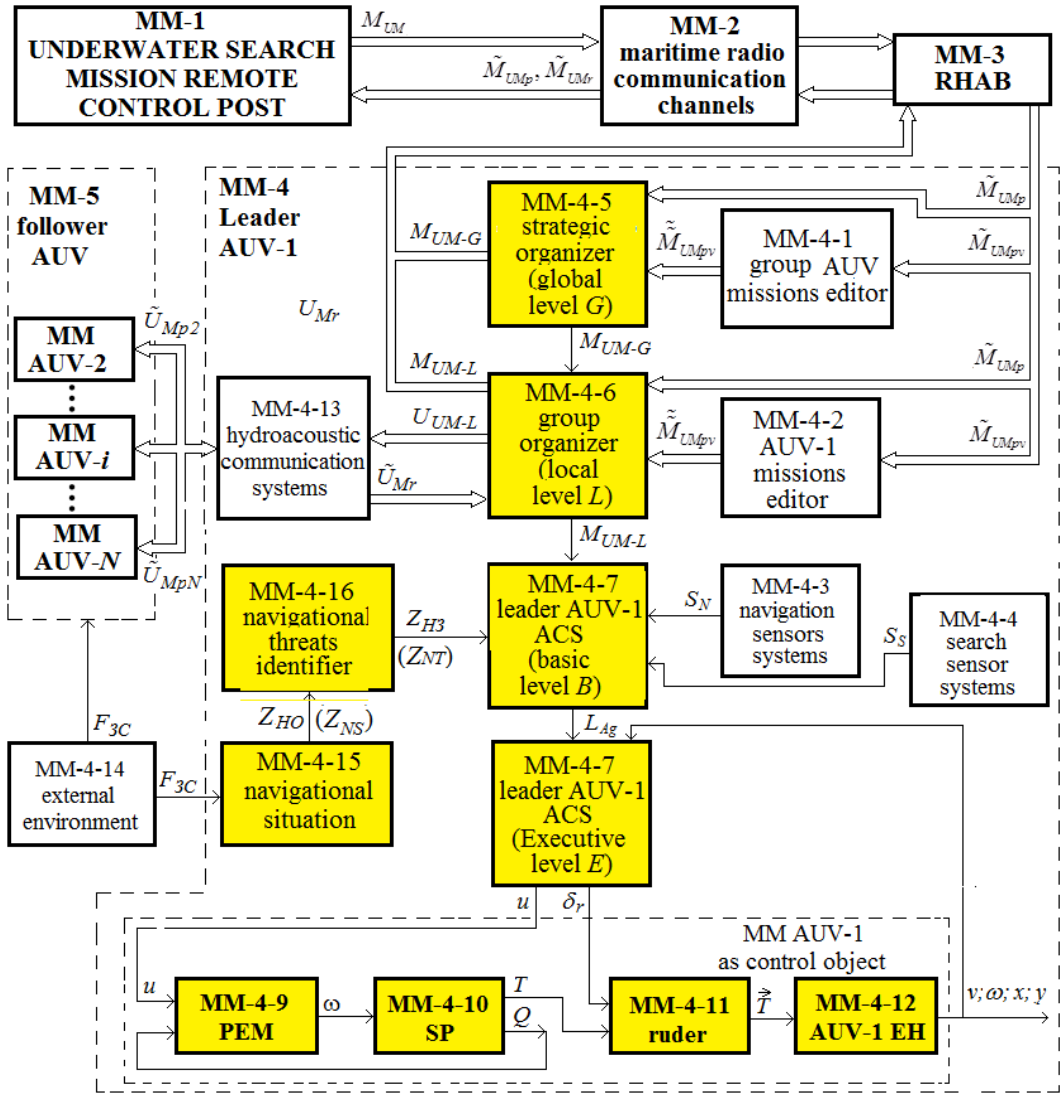


Figure 2.17 – Generalized structure of the simulation complex for studying the effectiveness of the automatic control system of the AUV group performing a joint underwater search mission (AUV structural blocks, which are studied later in the work, are highlighted by the filling)

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

Вказані моделі враховують функціонування каналу морського зв'язку (MM-2) і (каналу радіогідроакустичного

The input information for MM-1 is information on the results of the actual planning \tilde{M}_{UM} and implementation \tilde{M}_{UMr} of tasks of global G and local L hierarchical levels by the AUV group, coming from MM-2 (maritime communication channel) and MM-3 (radio-acoustic channel RHAB).

The specified models take into account the fun The specified models take into account

зв'язку РГАБ (ММ-3). Знак «тильда» вказує на те, що множини розроблених в САК АНПА-1 алгоритмів керування \widetilde{M}_{UMp} та результатів їх виконання надійшли з деякими обмеженнями, обумовленими роботою каналів радіо- та гідроакустичного зв'язку (див. відношення (2.22) нижче).

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

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

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

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

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

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

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

Присутність математичних моделей ММ-4-1 і ММ-4-2 в узагальненій структурі моделюючого комплексу пояснюється імовірною необхідністю коригування пошукових місій ($M_{UMpv} \subset M_{UM}$) при моделюванні роботи групи АНПА в умовах стисненої підводної навігації (наявності перешкод природного чи антропогенного походження); знак «подвійна тильда» означає, що місія M_{UMpv} відкоригована, виходячи з можливостей групи АНПА. У роботі вказані умови не досліджуються.

the functioning of the marine communication channel (ММ-2) and the radio-hydroacoustic communication channel RHAB (ММ-3). The “tilde” sign indicates that the set of control algorithms \widetilde{M}_{UMp} developed in AUV-1 ACS and the results of their implementation came with some limitations due to the operation of radio and sonar channels (see relation (2.22) below).

Mathematical models ММ-2 and ММ-3 for solving the research tasks are presented with the description of their two main properties:

- transmission (information) capacity (bandwidth) I_{MM-2} and I_{MM-3} ;
- time delay of information transmission/reception processes ΔT_{MM-2} and ΔT_{MM-3} .

In the work, the assumption was made about the same quantitative characteristics of these properties in the forward and reverse directions.

The result of the operation of the models ММ-2 and ММ-3 are streams about the results of the actual planning \widetilde{M}_{UMp} and the execution \widetilde{M}_{UMr} of the set of underwater missions, M_{UM} :

The development of mathematical models ММ-2 and ММ-3 is a trivial task of modeling radio and hydroacoustic communication channels [86; 87] and is not considered in the paper.

Mathematical models of the leader AUV and follower AUVs (ММ-4 and ММ-5) are the main objects of research and are characterized by the greatest complexity. Consider them in more detail. The presence of mathematical models ММ-4-1 and ММ-4-2 in the generalized structure of the modeling complex is explained by the probable need to adjust search missions ($M_{UMpv} \subset M_{UM}$) when modeling the AUV group in conditions of compressed underwater navigation (obstacles of natural or anthropogenic origin); the sign “double tilde” means that the M_{UMpv} mission is adjusted based on the capabilities of the AUV group. In the work, the specified conditions are not investigated.

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

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

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

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

- локальний рівень L автоматичного керування рухом ведучого АНПА-1 як одиночного підводного апарата в умовах навігаційної близькості інших ведених ним підводних апаратів групи (ММ-4-7); у роботі тут розв'язується задача L_{Ag}

Mathematical models ММ-4-3 and ММ-4-4 make it possible to study the influence of navigation sensors systems S_N (sensors of heading (course), linear and angular velocities and accelerations, etc.) and search sensors S_S (photo, video and sonar devices, magnetometers, etc.) on efficiency of AUV-1 ACS. These models use the known dependencies to estimate the errors of navigation systems GNSS $S_N=f(\Delta_{GNSS})$ [88] and INS (Inertial Navigation System) $S_S=f(\Delta_{INS})$ [84] and are not given here.

In addition, the mathematical model of ММ-4 of leader AUV-1 contains four control levels:

- global level G (ММ-4-5 of the group strategic organizer, where the planning and control of the underwater search mission is carried out); in the work at this level the task L_{Gr} is solved according to (1.2); At the same time, the decisions of the strategic organizer ММ-4-5, which manages the AUV group at the strategic level G (set M_{UM-G}), on the channel “RHAB – maritime radio channel” (ММ-3, ММ-2) are sent to the remote control post of the underwater search mission (ММ-1);

- basic level B of the AUV group control (ММ-4-6), which ensures the coordinated work of the AUV group when performing the i -th underwater mission $M_{UMi} \subset M_{UM}$; in the work analytical and algorithmic support for the organization of the underwater search mission B_{Gr} according to (1.2) is developed here; At the same time, the decisions of the group organizer ММ-4-6, which manages the AUV group at the local level L (set M_{UM-L}), on the channel “RHAB – marine radio channel” (ММ-3, ММ-2) are sent to the remote control post of the underwater search mission (ММ-1);

- local level L of automatic motion control of the leader AUV-1 as a single underwater vehicle in the conditions of navigational proximity of other follower underwater vehicles of the group (ММ-4-7); in the work the L_{Ag} problem is solved here according to (1.1)

згідно (1.1) як уніфікована задача для кожного окремого АНПА групи;

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

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

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

Результатом роботи вказаної моделі є:

– потоки сигналів керування U_{UM-L} від ММ-4-6, які після проходження через ММ-4-13 приймають значення $U_{MP2...N}$ і мають забезпечити виконання місії веденими АНПА;

– потоки сигналів U_{Mr} від моделей ведених АНПА (ММ-5), які після проходження через ММ-4-13 приймають значення U_{Mr} і несуть інформацію про фактичне виконання місії групою ведених АНПА.

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

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

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

as a unified task for every individual (separate) group AUV;

– executive level E (ММ-4-8), which simulates the AUV-1 controlled motion as a single underwater vehicle, which must maintain the specified course and speed; the output signals for ММ-4-8 are the control signal of the DC voltage propulsion motor u and the steering angle δ_r of the AUV-1 PSC (further in the work the plane motion for all group AUVs is considered).

As mathematical models for AUV-1 (ММ-4-9... ММ-4-12) the system of equations described in item 2.3.7 is accepted as this underwater vehicle as control object has the same properties, as well as any – follower AUV.

The mathematical model of the hydroacoustic communication system ММ-4-13, on the basis of known researches [89; 90], describes the functioning of hydroacoustic communication systems (Hydroacoustic Communication) between the leader- AUV -1 and the subordinate devices of the group.

The result of this model is:

– the flows of control signals U_{UM-L} from ММ-4-6, which after passing through ММ-4-13 take values $U_{MP2...N}$ and should ensure the execution of the mission conducted by AUV;

– the flows of signal U_{Mr} from AUV follower models (ММ-5), which after passing through ММ-4-13 take values U_{Mr} and carry information about the actual execution of the mission by the group AUV followers.

By analogy with (21-22), the follower AUV-1 hydroacoustic communication system model operation can be represented by the functions:

where $I_{MM-4-13}$, $\Delta T_{MM-4-13}$ – bandwidth and time delay of information transmission/reception processes of the sonar system.

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

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

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

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

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

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

The “tilde” sign means that information is received by consumers with time delays and bandwidth limitations of the sonar system.

The mathematical model of the external environment ММ-4-14 contains models of external forces of hydrodynamic nature F_{3C} , which in the process of performing an underwater mission act on the outer hull AUV-1 and hull AUV-2... N (flow effect, change of hydrophysical parameters of water, etc.) [72].

To assess the degree of threat of collisions between AUV – “agents” of the group, the generalized structure of the modeling complex includes:

- a model of the navigation situation around the leading AUV -1 (ММ-4-15), the output of which is the information of the Z_{NS} about the distance to the neighboring AUV groups and about other threats to the safe movement of this submarine;

- model of navigational threats identifier (ММ-4-16), which generates information Z_{NT} about the degree of real navigational threats to AUV-1 safe motion.

The principles of constructing these models based on the application of elements of the theory of fuzzy logic are described in [91; 92].

2.5. Короткий огляд методів експериментального дослідження систем автоматичного керування АНПА

2.5. A brief overview of experimental research methods of AUV automatic control systems

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

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

The main modern methods of experimental research for the AUV group and their ACS are computer modeling, basin tests, and marine (sea) full-scale tests. There are also bench (laboratory) tests when performing the initial previous work in basin and marine field tests.

Figure 2.18 shows the main types of AUV tests and the tasks that are solved as a result of their conduct.

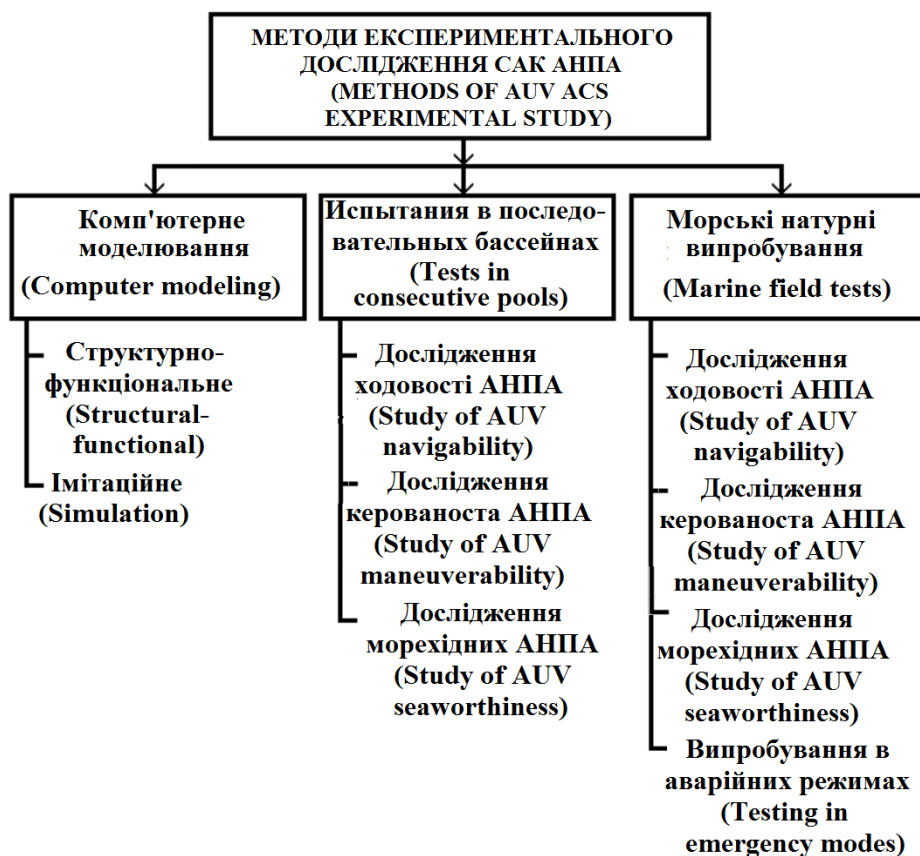


Рисунок 2.18 – Методи експериментального дослідження САК АНПА

Figure 2.18 – Methods of AUV ACS experimental study

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

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

Since experimental studies are an important component of the development of ACS of the individual AUVs and their group motion (see paragraph 2.1), we will give a brief description of each type of such tests, focusing on the peculiarities of their preparation and conduct.

Computer modeling of the AUV ACS implies the compilation of the research object mathematical model, its implementation on a computer and conduct of computational experiment with its help. In the process of such an experiment (usually performed in the form of mass computer computations) the properties of the research object as a control object are studied, and the efficiency of its ACS is checked [93].

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

Імітаційне моделювання є найбільш ефективним і універсальним варіантом комп'ютерного моделювання в області дослідження й керування складними технічними системами. Таке моделювання дозволяє враховувати наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійних характеристик елементів, невизначеності зовнішніх впливів і т.д. [96; 97].

До достоїнств комп'ютерного моделювання варто віднести:

- доступність використання пакетів прикладних програм для моделювання;
- можливість дослідження САК АНПА в таких режимах роботи, які в реальних умовах неможливі або складно досяжні;
- можливість знаходити оптимальні програмно-технічні рішення, не створюючи пробних деталей, вузлів і систем АНПА;
- можливість проводити дослідження без ризику для здоров'я людини й для природи.

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

Випробування морехідності АНПА в басейні проводяться з метою перевірити його працездатність при русі по схвильованій водній поверхні. Для цього басейн повинен бути обладнаний хвилепродук-

A distinction is made between structural-functional and simulation computer modeling. Structural and functional modeling is based on the use of schemes (block diagrams), graphs, drawings, diagrams, tables, figures, supplemented by special rules for their combination and transformation in order to obtain the necessary data [94; 95].

Simulation modeling is the most effective and versatile version of computer modeling in the field of research and management of complex technical systems. Simulation modeling makes it possible to take into account such factors as the presence of discrete and continuous elements, non-linear characteristics of elements, uncertainty of external influences, etc. [96; 97].

The advantages of computer modeling include:

- availability of using application packages for modeling;
- the possibility of studying the AUV ACS in such modes of operation, which in real conditions are impossible or difficult to achieve;
- the ability to find optimal software and hardware solutions without creating test parts, components and systems AUV;
- the ability to conduct research without risk to human health and nature.

The AUV *basin tests* and their ACS are an effective tool for studying the AUV navigability, maneuverability and seaworthiness of AUV [98]. During the AUV maneuverability tests in the basin, its quality is determined and it maintains the specified speed under the given conditions with the PSC minimum power consumption. Of two similar AUVs, the one that develops a higher speed with the same PSC power has better maneuverability. During AUV controllability pool tests, its ability to change the movement direction under the PSC action is investigated.

Tests of seaworthiness of AUV in the pool are carried out for the purpose of checking its working capacity (performance) at movement on rough water surface.

тором. За аналогією з надводними судами [99] до основних морехідних характеристик відносяться схожість на хвилю й заливання корпусу АНПА.

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

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

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

To do this, the pool must be equipped with a waveform. By analogy with surface vessels [99], the main seaworthiness characteristics are similar to the wave and flooding of the AUV hull.

The most complex and, at the same time, the most reliable method of experimental study of the AUV ACS is its *marine field tests*. Such tests make it possible to perform a comprehensive verification of the efficiency of the AUV ACS in both surface and underwater modes of operation.

However, the preparation and, in fact, the organization of marine full-scale tests of the AUV requires the development of special programs and test methods, the development and creation of special measuring and control equipment, as well as special preparation of the water area for safe testing [100].

Therefore, in the work on the whole list of tasks for the development of ACS group control AUV (see p. 1.5) marine field tests are conducted only for the most important task for the first direction of C_{Ag} automation Co-Co-Ro – technology – the problem of automatic motion control single AUV as an “agent” of the group in conditions of navigational proximity to other AUVs.