

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**Г. В. БАБКІН, Ж. Ю. БУРУНІНА,
А. М. ВОЙТАСИК, О. П. КЛОЧКОВ,
В.І. КОРИЦЬКИЙ, А. С. СІРІВЧУК**

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ
БУДІВНИЦТВА БЕЗЕКІПАЖНИХ
ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ**

Під загальною редакцією д.т.н. Блінцова В.С.

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв. НУК. 2018

УДК 629
ББК 39.4

Укладачі: Г. В. Бабкін, Ж. Ю. Буруніна,
А. М. Войтасик, О. П. Клочков,
В.І. Корицький, А. С. Сірівчук
Рецензент Д. В. Костенко, канд. техн. наук

Бабкін Г.В.

Математичні моделі та методики будівництва безекіпажних підводних апаратів: Методичні вказівки/ Г. В. Бабкін, Ж. Ю. Буруніна, А. М. Войтасик, О. П. Клочков, В.І. Корицький, А. С. Сірівчук // Під загальною редакцією д.т.н. Блінцова В.С. – Миколаїв: НУК, 2018.– 52 с.

Учбовий посібник описує декілька методик будівництва безекіпажних автономних та прив'язних підводних апаратів-роботів призначених для вирішення широкого спектру підводних задач. В наданих матеріалах представлено методики морських натурних випробувань безекіпажних автономних та прив'язних підводних апаратів спеціального призначення.

Призначений для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізація «Морська робототехніка»

УДК 629
ББК 39.4

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

ВСТУП

Безекіпажні морські апарати і системи (БМАС, англ. – Unmanned Maritime Systems, UMS) на цей час є магістральним напрямком розвитку морської техніки у провідних морських державах світу. Вони активно застосовуються для вирішення екологічних, пошукових, охоронних, антитерористичних та оборонних завдань [1-4].

На флотах розвинених морських держав світу найбільше застосування знайшли: безекіпажні самохідні автономні підводні апарати (АПА, англ. – Autonomous Underwater Vehicle, AUV); безекіпажні самохідні прив'язні підводні апарати (ППА, англ. – Remotely Operated Vehicle, ROV); безекіпажні буксирувані підводні апарати (БПА, англ. – Towed Underwater Vehicle, TUV)), малорозмірні безекіпажні надводні судна (МНС, англ. – Unmanned Surface Vehicles, USV); безпілотні літальні апарати (літаки і гелікоптери морського базування і застосування) (БЛА, англ. – Unmanned Aircraft Systems, UAS).

На цей час склались сприятливі умови для кооперації вітчизняних організацій різних форм власності для проведення спільних науково-дослідних, дослідно-конструкторських та виробничих робіт у напрямку створення нових зразків БМАС, а також для їх малосерійного виробництва.

1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРТОСТІ ТА ТЕРМІНІВ СТВОРЕННЯ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ

Автономні підводні апарати з радіобуєм (АПА-РБ) призначені для:

- оперативного моніторингу підводної обстановки з метою виконання природоохоронних робіт в портах та суднохідних каналах;
- забезпечення навігаційної безпеки під час руху судна;
- пошуку та інспекції затонулих об'єктів відео-, гідроакустичними і магнітометричними приладами;
- супроводу водолазних та аварійно-рятувальних робіт;
- обстеження гідротехнічних споруд портів в реальному часі з цифровим фото, відео та картографічним документуванням;
- виконання відбору проб води та ґрунту для експертного аналізу;
- виконання простих технічних робіт за допомогою маніпулятора. Наприклад підйом малорозмірних об'єктів та установка на донну поверхню навігаційних або екологічних приладів та апаратури.

АПА-РБ об'єднують переваги автономних ненаселених підводних апаратів (незалежність руху від судна забезпечення і велика площа робочої зони) і прив'язних ненаселених підводних апаратів (виконання роботи в режимі реального часу).

Для виконання підводних місій на мілководді пропонується застосовувати АПА-РБ з динамічно змінюваною у процесі експлуатації довжиною кабель-буксира (КБ). Пропонований архітектурно-конструктивний тип підводного апарата містить у якості зовнішнього націпного обладнання буксирований радіобуй, який розташований у верхній кормовій частині АПА та має змогу автоматично відстикуватись від нього, рухатись по поверхні моря в буксированому режимі для забезпечення двохстороннього зв'язку з береговим (БПК) або судновим (СПК) постом керування, а також автоматично пристиковуватись до АПА після завершення місії [5].

Керовану зміну довжини КБ для вказаних режимів забезпечує автоматична лебідка КБ, яка розташована на АПА.

Для побудови АПА-РБ необхідно виконати огляд основних його складових. До складу системи АПА-РБ входить:

- автономний підводний апарат (АПА) з кабельною лебідкою (КЛ);
- радіобуй (РБ);
- навісне обладнання (НО);

- система керування (СК) на базі двох персональних комп'ютерів (пульт керування підводним апаратом та пульт візуалізації та картографування підводної обстановки);
- інженерні системи (ІС).

На рис. 1 показано застосування АПА-РБ з берегової станції. Зазначений АПА-РБ розробляється у НУК ім. адм. Макарова і на цей час знаходиться на етапі розробки.

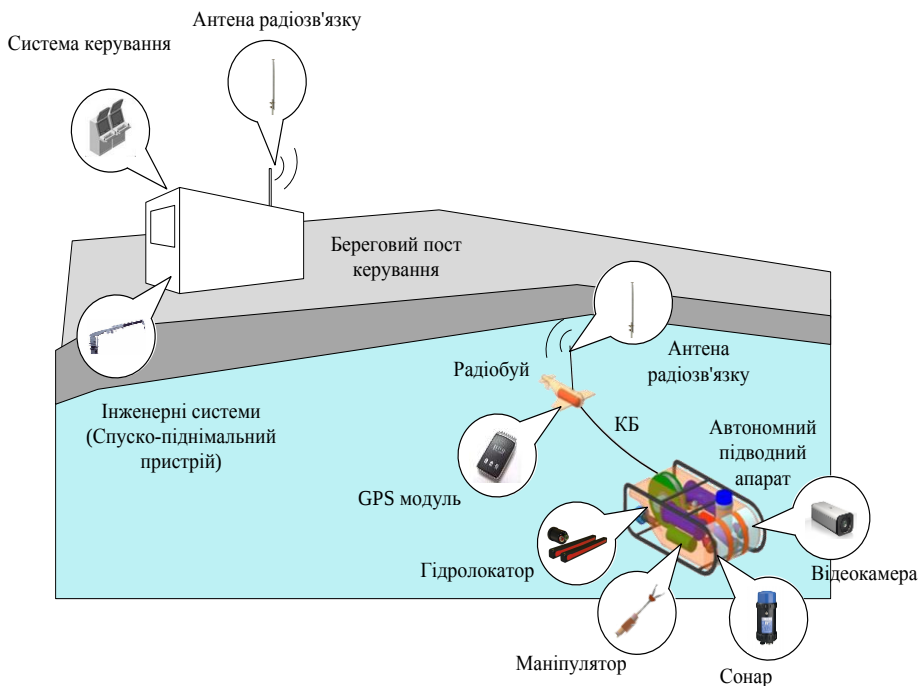


Рисунок 1 – Складові типового АПА-РБ

Дослідження показали, що найбільш ефективною є змішана декомпозиція проекту створення АПА-РБ (рис. 2), при якій можна гнучко управляти роботами проекту з урахуванням як освоєних, так і нових процесів створення наукоємної підводної продукції.

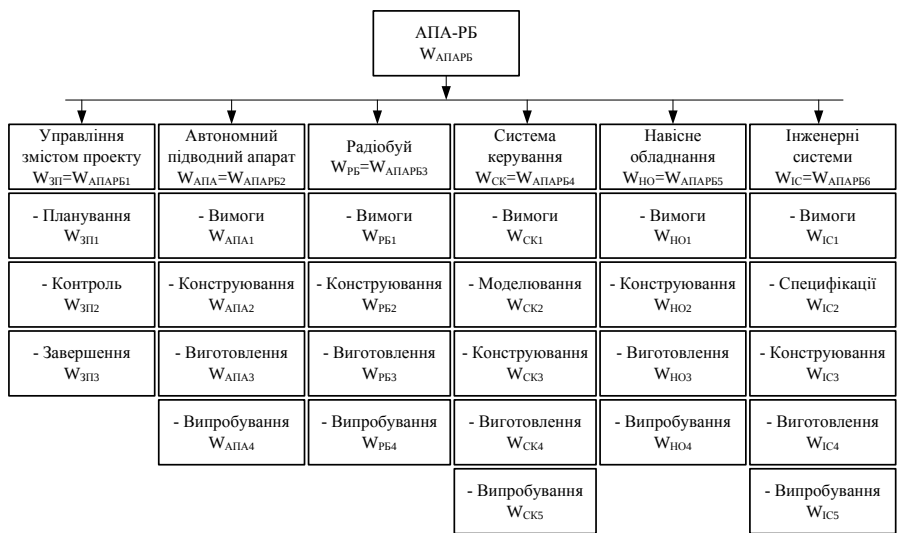


Рисунок 2 – Структура робіт проекту створення АПА-РБ

Змішана декомпозиція виконується у наступній послідовності:

- визначаються основні елементи проекту;
- виокремлюються наукоємні елементи проекту, виконання яких потребує розв’язання прикладних науково-дослідницьких задач;

- визначаються умови достатності деталізації визначених елементів;
- деталізуються визначені елементи проекту;
- виконується декомпозиція елементів (робіт) на складові та визначається їх достатність і загальна кількість;
- коригуються технічні завдання на розробку окремих елементів морського комплексу (при перевищенні встановлених обмежень);
- приймаються рішення про завершення декомпозиції робіт проекту.

Загальний обсяг робіт по створенню БМАС опишемо залежністю:

$$W_{АПАРБ} = \sum_i \varepsilon_i W_{АПАРБi} = \sum_i \varepsilon_i \sum_j W_{АПАРБij} ,$$

де ε_i – вагові коефіцієнти, що визначають внесок i -ї складової проекту;

$\sum_j W_{АПАРБij}$ – обсяг робіт проекту створення БМАС, який

визначається:

$$W_{АПАРБ1} = \sum_j W_{зпj} - \text{обсяг робіт, що пов'язаний безпосередньо}$$

з проектом;

$$W_{АПАРБ2} = \sum_j W_{АПAj} - \text{обсяг робіт, пов'язаний зі створенням}$$

АПА;

$$W_{АПАРБ3} = \sum_j W_{РБj} - \text{обсяг робіт, пов'язаний зі створенням РБ};$$

$$W_{АПАРБ4} = \sum_j W_{СКj} - \text{обсяг робіт, пов'язаний зі створенням СК};$$

$$W_{АПАРБ5} = \sum_j W_{НОj} - \text{обсяг робіт, пов'язаний зі створенням}$$

НО;

$$W_{АПАРБ6} = \sum_j W_{ІСj} - \text{обсяг робіт, пов'язаний зі створенням ІС.}$$

Узагальненим результатом планування змісту проекту створення АПА-РБ є:

- комплект документів (обґрунтування проекту, опис характеристик серії приладів і апаратів з РБ та їх технічних і виробничих характеристик як продукту проекту тощо);

- опис та обґрунтування прийнятої структури проекту;

- опис та обґрунтування плану управління змістом проекту з описом об'єктів і точок контролю, критеріїв оцінки поточних та остаточних результатів проекту.

У ході реалізації проекту постійно виникає проблема багатоваріантності рішень, які відрізняються за характеристиками та вартістю. Необхідність в економічному

обґрунтуванні та його характер потрібні на кожному з етапів реалізації проекту, а саме:

- ескізний проект, у ході якого виконується конструкторська проробка оптимального варіанта АПА-РБ, креслення основних складових частин та уточнюються загальний вигляд і параметри виробу;

- технічний проект, у ході якого виконують роботи, необхідні для забезпечення вимог до АПА-РБ і дозволяють отримувати повне уявлення про його конструкцію, оцінити його відповідність вимогам технічного завдання (ТЗ), технологічність, ступінь складності виготовлення, способи пакування, можливості транспортування і монтажу на місці застосування, зручність експлуатації і ремонтпридатність;

- робоча конструкторська документація для виготовлення дослідного зразка, яку розробляють відповідно до вимог ТЗ;

- виготовлення дослідного зразка, на якому виготовляється дослідний зразок для визначення його відповідності вимогам ТЗ і можливості пред'явлення на державні випробування;

- державні випробування дослідного зразка, на якому проводяться випробування дослідного зразка, відповідно до розроблених програм та методик, для перевірки відповідності характеристик виробу вимогам ТЗ;

– затвердження робочої конструкторської документації для організації серійного виготовлення, на якому відбувається узгодження та затвердження комплекту конструкторської документації та її підготовка до налагодження серійного виробництва.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОБСЯГІВ РОБІТ ПРИ СТВОРЕННІ ПРИВ'ЯЗНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА КОРАБЕЛЬНОГО БАЗУВАННЯ

Для побудови БМАС даного типу необхідно визначити складові продукту. Розглянемо ці складові для випадку створення одного з найбільш розповсюдженого виду БМАС – прив'язного підводного апарата (ППА, шифр ВСПН).

До складу типового ППА як виду БМАС входять наступні елементи: підводний апарат (ПА); кабельна лебідка; пост керування (ПК); навісне обладнання; інженерні системи.

На рис. 3 показано склад такого ППА для застосування на кораблі ВМС ЗС України.

Вказаний корабель розробляється на одному з підприємств Державного концерну «Укроборонпром», а запланований на його борту ППА (шифр «ВСПН») розробляється у Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова і на цей час знаходиться на етапі створення дослідного зразка.



Рисунок 3 – Складові типового ППА як виду БМАС

ППА (шифр ВСПН) призначений для реалізації двох основних підводних місій:

- 1) доставки корисного вантажу в задану точку морського дна та його установку на морське дно;
- 2) пошук за допомогою гідроакустичних та підводних відеозасобів раніше встановленого корисного вантажу на морському дні, прийом корисного вантажу на борт ПА та його доставка на корабель-носіє [6].

В якості корисного вантажу використовуються два технологічні модулі автономної радіогідроакустичної станції (АРГАС) сполучені між собою кабельною лінією.

Модуль-1 призначений для прийому та обробки акустичних сигналів отриманих від гідроакустичної станції (рис. 4, *а*).

Модуль-2 призначений для забезпечення передачі отриманої інформації за допомогою радіолокації на корабель-носій або береговий пост (рис. 4, *б*).

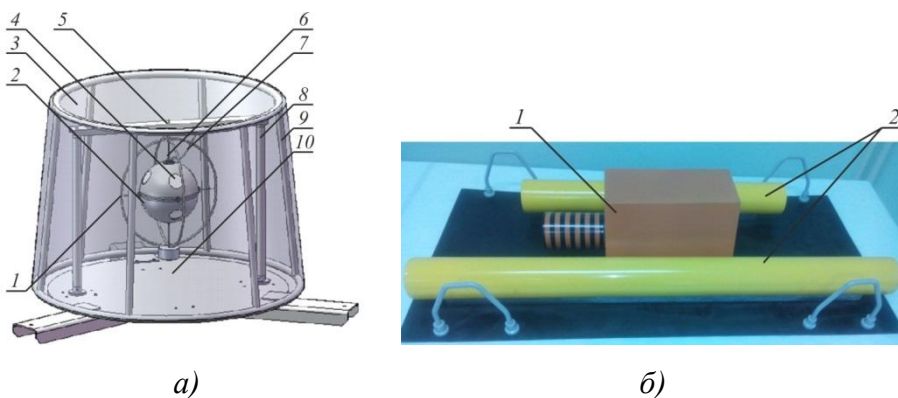


Рисунок 4 – Загальний вигляд

а) –модуль-1: 1) – каркас системи підвіски; 2) – модуль векторно-фазового аналізатора; 3) – обтічник; 4) – звукова комірка; 5) – перекладина; 6) – амортизатор; 7) – кабель; 8) – стійка; 9) – каркас обтічника; 10) – основа; *б*) – модуль-2: 1) – лебідка радіобуя; 2) – міцні корпуси джерел живлення лебідки та модуля-1

Як об'єкт керування корпус ППА (шифр «ВСПН») можна представити у вигляді прямокутного паралелепіпеда із округленими гранями. На даній конструкції розміщуються вісім однотипних рушійних пристроїв, які дозволяють виконувати складні просторові переміщення ППА в підводному середовищі. Розташування маршових рушіїв підводного апарату під кутом 45 градусів відповідно горизонтальної площини надає ряд переваг:

- можливість обертання ППА навколо точки центру мас;
- велику стійкість при лаговому русі ППА.

Наявність чотирьох рушійних пристроїв, що розміщуються в вертикальній площині, дозволяють застосовувати їх не лише для занурення та спливання ППА, але і для стабілізації показників крену та диференту ППА при виконанні робіт із розгортанням та згортанням корисного вантажу на морському дні.

Керування рушійно-кермовим комплексом ППА (шифр «ВСПН») виконується за допомогою частотних регуляторів, що розміщуються в міцних корпусах.

Забезпечення якісного відеодокументування в процесі виконання підводних робіт реалізується при залученні системи штучного освітлення. В якості виконавчих елементів застосовуються однотипні підводні світильники (прожектори) побудовані на базі *LED*-матриць.

В ППА (шифр «ВСПН») необхідно застосовувати три цифрові відеокамери з великою розподільчою здатністю, що надаватимуть візуальну інформацію в процесі керування ППА під водою та інформацію про поточний стан відділень для корисного вантажу в процесі виконання розгортання та згортання корисного вантажу на морському дні.

Застосоване на борту ППА (шифр «ВСПН») електрообладнання дозволяє передбачити дві можливі реалізації енергетичної системи: автономна (від бортової акумуляторної батареї) та телекерована (від корабельної електромережі через кабель-трос).

Дослідження показали, що найбільш ефективною є змішана декомпозиція проекту створення БМАС (рис. 5), при якій можна гнучко управляти роботами проекту з урахуванням як освоєних, так і нових процесів створення наукоємної підводної продукції.

Змішана декомпозиція виконується у наступній послідовності:

- визначаються основні елементи проекту;
- виокремлюються наукоємні елементи проекту, виконання яких потребує розв’язання прикладних науково-дослідницьких задач;

- визначаються умови достатності деталізації визначених елементів;
- деталізуються визначені елементи проекту;
- виконується декомпозиція елементів (робіт) на складові та визначається їх достатність і загальна кількість;
- коригуються технічні завдання на розробку окремих елементів морського комплексу (при перевищенні встановлених обмежень);
- приймаються рішення про завершення декомпозиції робіт проекту.

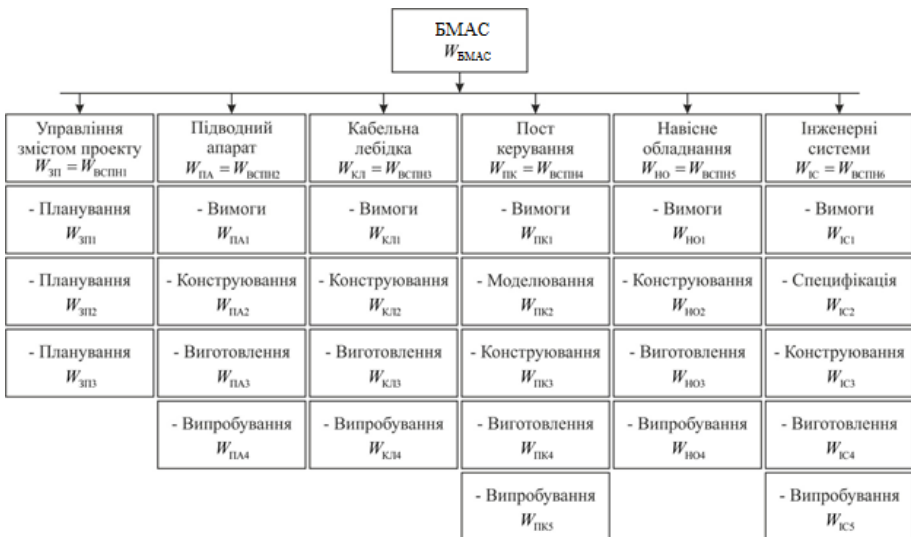


Рисунок 5 – Структура робіт проекту створення БМАС

Загальний обсяг робіт по створенню БМАС

$$W_{\text{БМАС}} = \sum_i \varepsilon_i W_{\text{ВСПН}i} = \sum_i \varepsilon_i \sum_j W_{\text{ВСПН}ij},$$

де ε_i – вагові коефіцієнти, що визначають внесок i -ї складової проекту;

$\sum_j W_{\text{ВСПН}ij}$ – обсяг робіт проекту створення БМАС, який

визначається:

$W_{\text{ВСПН}1} = \sum_j W_{\text{П}j}$ – обсяг робіт, що пов’язаний безпосередньо

з управлінням проектом;

$W_{\text{ВСПН}2} = \sum_j W_{\text{ПА}j}$ – обсяг робіт, пов’язаний зі створенням ПА;

$W_{\text{ВСПН}3} = \sum_j W_{\text{КЛ}j}$ – обсяг робіт, пов’язаний зі створенням КЛ;

$W_{\text{ВСПН}4} = \sum_j W_{\text{ПК}j}$ – обсяг робіт, пов’язаний зі створенням СК;

$W_{\text{ВСПН}5} = \sum_j W_{\text{НО}j}$ – обсяг робіт, пов’язаний зі створенням НО;

$W_{\text{ВСПН}6} = \sum_j W_{\text{ІС}j}$ – обсяг робіт, пов’язаний зі створенням ІС.

Узагальненим результатом планування змісту проекту створення БМАС є:

- комплект документів (обґрунтування проекту, опис характеристик серії приладів і апаратів БМАС та їх технічних і виробничих характеристик як продукту проекту тощо);
- опис та обґрунтування прийнятої структури проекту;
- опис та обґрунтування плану управління змістом проекту з описом об'єктів і точок контролю, критеріїв оцінки поточних та остаточних результатів проекту.

У ході реалізації проекту постійно виникає проблема багатоваріантності рішень, які відрізняються за характеристиками та вартістю. Техніко-економічне обґрунтування потрібне для вибору оптимального варіанта, який буде відповідати прийнятим критеріям. Необхідність в економічному обґрунтуванні та його характер потрібні на кожному з етапів реалізації проекту, а саме:

- ескізний проект, у ході якого виконується конструкторська проробка оптимального варіанта БМАС, креслення основних складових частин та уточнюються загальний вигляд і параметри виробу;
- технічний проект, у ході якого виконують роботи, необхідні для забезпечення вимог до БМАС і дозволяють отримувати повне уявлення про його конструкцію, оцінити його

відповідність вимогам технічного завдання (ТЗ), технологічність, ступінь складності виготовлення, способи пакування, можливості транспортування і монтажу на місці застосування, зручність експлуатації і ремонтпридатність;

- робоча конструкторська документація для виготовлення дослідного зразка, яку розробляють відповідно до вимог ТЗ;

- виготовлення дослідного зразка, на якому виготовляється дослідний зразок для визначення його відповідності вимогам ТЗ і можливості пред'явлення на державні випробування;

- державні випробування дослідного зразка, на якому проводяться випробування дослідного зразка, відповідно до розроблених програм та методик, для перевірки відповідності характеристик виробу вимогам ТЗ;

- затвердження робочої конструкторської документації для організації серійного виготовлення, на якому відбувається узгодження та затвердження комплекту конструкторської документації та її підготовка до налагодження серійного виробництва.

З МЕТОДИКИ МОРСЬКИХ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ БЕЗЕКІПАЖНИХ АВТОНОМНИХ ТА ПРИВ'ЯЗНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 Критерії, за якими оцінюється якість процесів керування рухом підводних апаратів

До якості систем та процесів керування безекіпажними ПА, особливо спеціального призначення, пред'являються високі вимоги [7, 8]. В даному підрозділі звіту приведено методики проведення морських натурних випробувань безекіпажних автономних та прив'язних ПА. Метою випробувань є визначення критеріїв якості процесів керування рухом ПА та перевірка їх відповідності вимогам, які пред'являються до систем керування підводними апаратами.

Якість процесів стабілізації керованих змінних (курсу, глибини занурення) оцінюється характеристиками перехідного процесу (рис. 6).

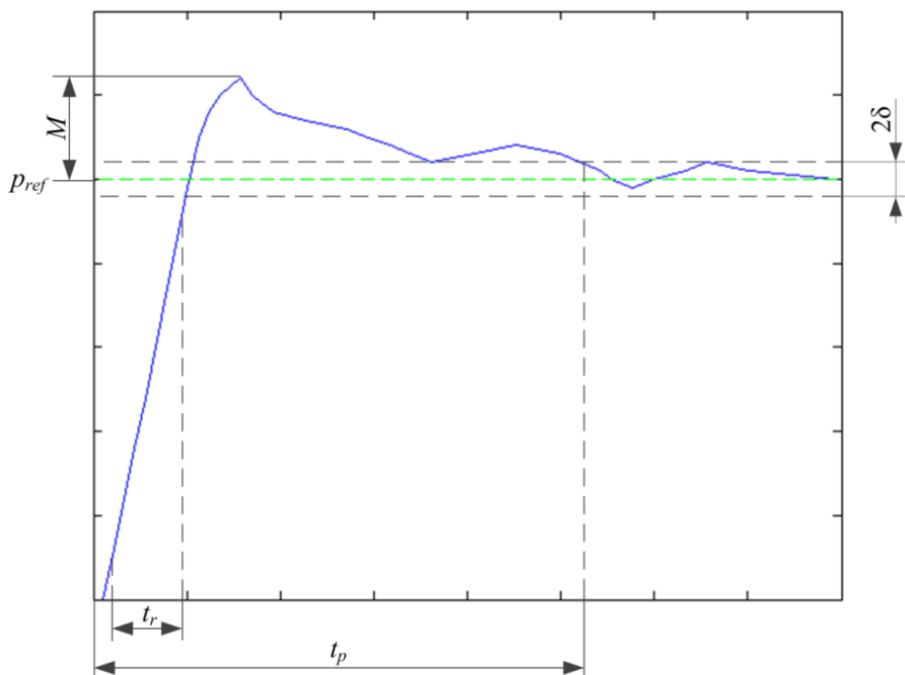


Рисунок 6 – Визначення критеріїв якості перехідного процесу

Перерегулювання M визначається як відношення максимального значення p_{max} , якого досягла керована змінна p після першого перевищення заданого значення p_{ref} , до амплітуди стрибка керованої змінної:

$$M = \frac{p_{max}}{p_{ref} - p_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де p_0 – миттєве значення керованої змінної на початку перехідного процесу.

Тривалість перехідного процесу t_p – це проміжок часу між початком перехідного процесу та моментом, коли відхилення керованої змінної перестане виходити за межі діапазону $[-\delta; \delta]$. Проміжок часу між моментами, коли керована змінної досягає рівнів 10 % та 90 % від амплітуди сигналу керування є часом зростання t_r керованої змінної.

Динамічна похибка ε_d є відношенням амплітуди коливань керованої змінної Δp в усталеному режимі до амплітуди сигналу керування:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta p}{p_{ref} - p_0} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Статична похибка ε_s є відхиленням середнього значення $p_{m.st.}$ керованої змінної в усталеному режимі від значення сигналу керування:

$$\varepsilon_s = p_{m.st.} - p_{ref}. \quad (3)$$

Якість процесу керування рухом безекіпажного підводного апарата оцінюється тривалістю перехідного процесу, а також середньоквадратичним відхиленням керованої змінної:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_{ref})^2}; \quad (4)$$

де N – кількість вимірювань керованої змінної після виходу підводного апарата в усталений режим руху.

Середні значення критеріїв якості визначаються за наступною формулою:

$$C_{i \text{ mean}} = \frac{\sum_j C_{ij}}{N_i}, \quad (5)$$

де C_{ij} – значення критерію якості, отримане під час виконання j -ї спроби випробування під номером i ; N_i – кількість спроб виконання випробування під номером i .

Проведемо перевірку працездатності підводного апарата перед проведенням морських натурних випробувань.

Мета перевірки підводного апарата – впевнитись у працездатності його основних вузлів та повноті комплектації.

Дана перевірка виконується за наступним алгоритмом:

- 1) провести зовнішній огляд ПА та переконатись у цілісності його складових;
- 2) перевірити герметичність міцних корпусів ПА;
- 3) перевірити цілісність кабель-тросу (кабель-буксиру) (для ППА);
- 4) перевірити комплектацію та працездатність пульта керування;
- 5) перевірити комплектацію та працездатність блоку комутації (для ППА);
- 6) перевірити працездатність сенсорів та виконавчих пристроїв.

Послідовність перевірки наступна:

- перевірити ПА на комплектність і відповідність конструкторській документації;
- провести зовнішній огляд вузлів ПА та цілісність компенсаторів гідростатичного тиску на корпусах електроприводів; перевірити відсутність підтікань компенсуючої рідини електроприводів. За відсутності механічних пошкоджень компенсаторів і за відсутності патьоків компенсуючої рідини електроприводи вважаються за тих, що пройшли випробування; провести зовнішній огляд освітлювальних приладів;

- перевірити цілісність ілюмінаторів. Ілюмінатори не повинні мати сколів і тріщин;

- перевірити затягування накидних гайок освітлювальних приладів. Щільність прилягання кільця ущільнювача визначається візуально. При нормальному затягуванні накидних гайок, освітлювальні прилади вважаються за тих, що пройшли випробування;

- провести зовнішній огляд відео боксу;

- перевірити цілісність ілюмінатора. Ілюмінатор не повинен мати сколів і тріщин. Перевірити затягування накидної гайки. Щільність прилягання кільця ущільнювача визначається візуально. При нормальному затягуванні накидної гайки, відеобокс вважається за той, що пройшов випробування;

- провести зовнішній огляд кабелів заборотної електрокомутації; перевірити відсутність пошкоджень оболонок кабелів; перевірити затягування накидних гайок гермороз’ємів; за відсутності зовнішніх пошкоджень оболонок кабелі вважаються за тих, що пройшли випробування; провести зовнішній огляд блоку плавучості; перевірити відсутність тріщин і сколів гідроізоляції. За відсутності пошкоджень блок плавучості вважається за той, що пройшов випробування. провести зовнішній огляд несучої рами. За відсутності зауважень по вузлах апарату, ПА вважається за той, що пройшов

випробування; перевірити затягування накидних гайок фланців міцних корпусів;

- перевірити їх герметичність, для чого відкрутивши пробки на передніх кришках міцних корпусів, підключити до корпусів вакуумний насос і створити розрідження 0,4 кг;

- витримати міцні корпуси при цьому розрідженні в перебігу тимчасового проміжку не менше 20 хвилин. Якщо протягом 20 хвилин розрідження в корпусі змінилося менш ніж на 0,01 кг, корпус вважається за той, що пройшов випробування;

- упевнитись у відсутності пошкоджень ходового та корінного кінців кабель-тросу (кабель-буксиру), а також його оболонки;

- перевірити цілісність жил кабель-тросу (кабель-буксиру) та його токоведучих частин шляхом вимірювання електричного опору жил за допомогою мультиметра;

- перевірити цілісність оболонки кабелю вимірюванням опору ізоляції за допомогою мегомметра. Якщо зовнішніх ушкоджень не виявлено і відхилення зазначених вище параметрів не виходить за допустимі межі, кабель-трос (кабель-буксир) вважається за той, що пройшов випробування; перевірити пульт управління на комплектність і відповідність робочій конструкторській документації; провести зовнішній огляд пульта управління. Корпус пульта управління не повинен мати

механічних пошкоджень. Роз'єми не повинні мати сколів і тріщин; перевірити цілісність органів управління пульта;

- перевірити якість електричного монтажу дротів, що підводять, маркування, кріплення деталей і складальних одиниць. За відсутності зауважень по вузлах пульт управління вважається за той, що пройшов випробування;

- перевірити блок комутації на комплектність і відповідність робочій конструкторській документації;

- перевірити якість електричного монтажу дротів, що підводять, маркування, кріплення деталей і складальних одиниць. За відсутності зауважень по вузлах блок комутації вважається за той, що пройшов випробування;

- перевірка правильності управління виконавчими пристроями виконується шляхом завдання відповідного впливу на органи пульта управління і візуальному контролю реакції ПА на ці дії;

- перевіряється відповідність напрямку обертання гребних гвинтів, включення, виключення та регулювання яскравості світильників.

Робота датчиків перевіряється шляхом вимірювання відповідного фізичного параметра навколишнього середовища.

Результати випробувань занести до протоколу.

Розглянемо тепер метрологічне забезпечення випробувань. Обладнання, яке входить до складу метрологічного забезпечення випробувань зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Метрологічне забезпечення випробувань

№ п/п	Найменування приладу	Нор.-тех. документ	Позначення документу на постачання	Призначення приладу	Клас точності приладу
1	2	3	4	5	6
1	Мультиметр UNI-T (1 шт.)		Паспорт приладу	Вимірювання струму, напруги, опору ланцюгів	1,5
2	Мегомметр M1101M (1 шт.)	ТУ 25-04- 3719-79	Паспорт приладу	Вимірювання опору ізоляції	1
3	Манометр МП-100Э 0-250 кг/см ² (1 шт.)	ГОСТ 12716-76		Вимірювання тиску	2,5

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
4	Інерціальний навігаційний модуль MPU-9250 (1 шт.)	IEEE 2700-2014		Вимірювання кутів курсу, крену, диференту	3,0
5	Сенсор тиску MLH300PSL 06A (1 шт.)		Паспорт приладу	Вимірювання глибини	5,0
6	Сенсор дистанції MB-1003 (4 шт.)		Паспорт приладу	Вимірювання дистанції	1,0

3.2 Методика проведення морських натурних випробувань безекіпажних самохідних прив'язних підводних апаратів

Перевірка якості процесів керування рухом безекіпажних самохідних прив'язних підводних апаратів (БСППА) передбачає виконання таких випробувань:

- 1) перевірка регуляторі курсу та глибини;

2) перевірка режиму траєкторного руху.

Умовні позначення для керованих змінних та критеріїв якості, які визначаються в ході морських натурних випробувань БСППА представлено в табл. 2.

Виконаємо оцінювання якості процесу стабілізації керованих змінних.

Для випробувань вибирають район з глибиною 1,5–2,5 метра.

Таблиця 2 – Умовні позначення змінних та критеріїв якості процесів керування рухом БСППА

Найменування величини	Вид змінної та одиниці виміру			
	Курс	Одиниці виміру	Глибина	Одиниці виміру
1	2	3	4	5
Миттєве значення	φ_r	°	h_r	м
Задане значення	$\varphi_{r.ref}$	°	$h_{r.ref}$	м
Середнє значення	$\varphi_{r.m.st.}$	°	$h_{r.m.st.}$	м
Максимальне значення	$\varphi_{r.max}$	°	$h_{r.max}$	м
Початкове значення	φ_{r0}	°	h_{r0}	м
Статична похибка	$\varepsilon_{sp.r}$	°	$\varepsilon_{sh.r}$	м

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
Перерегулювання	$M_{\phi.r}$	%	$M_{h.r}$	%
Динамічна похибка	$\varepsilon_{d\phi.r}$	%	$\varepsilon_{dh.r}$	%
Обмеження відхилення в устал. режимі	$\delta_{\phi.r}$	%	$\delta_{h.r}$	%
Тривалість перехідного процесу	$t_{p\phi.r}$	с	$t_{ph.r}$	с
Час зростання	$t_{r\phi.r}$	с	$t_{rh.r}$	с

Випробування складається з двох кроків: оцінювання якості процесу стабілізації керованої змінної при відсутності поступального руху корпусу та за його наявності; оцінювання якості процесу одночасної стабілізації курсу та глибини при поступальному рухові корпусу апарата.

Випробування проводять за наступним алгоритмом:

1) встановити БСППА у вихідне положення;

2) задати амплітуди сигналів керування $u_i = p_{r.ref.i} - p_{r0.i}$

та ввімкнути необхідний режим стабілізації;

3) дочекатись моменту виходу процесів керування в усталений режим (коливання керованих змінних повинні знаходитись у межах $\left[1 - \delta_{p.r.i}; 1 + \delta_{p.r.i}\right] \cdot p_{r.ref.i}$);

4) якщо переходу до усталеного режиму не відбувається, внести зміни до налаштувань системи керування та повторити пп. 2-3;

5) утримувати БСППА в усталеному режимі впродовж заздалегідь встановленого періоду t_{st} ;

6) перевести систему керування рухом апарата до ручного режиму;

7) зберегти залежності керованих змінних від часу $p_{r.i}(t)$ та обчислити значення критеріїв якості процесів керування за формулами (1)-(3);

8) у разі виникнення в процесі стабілізації керованої змінної зовнішніх збурень, визначити амплітуди збурень u_d , перерегулювання M_d , тривалості процесів компенсації збурень t_d , статичні (ϵ_{sd}) та динамічні (ϵ_{dd}) похибки регулювання керованої змінної після переходу процесу до усталеного режиму за формулами (1)-(3);

9) довільним чином встановити корпус БСППА в нове положення;

10) повторити виконання пп. 2-8 2-4 рази;

11) змінюючи амплітуди сигналів керування в діапазоні $[u_{i_{\min}}; u_{i_{\max}}]$ з певними кроками Δu_i , повторити виконання пп. 1-10.

Керування поступальним рухом апарата здійснюється сигналом v , який може приймати значення з діапазону $[-1; 1]$. Нижня межа даного діапазону відповідає максимальному значенню сигналу керування для руху апарата назад, а верхня – максимальному значенню сигналу для руху вперед.

На першому кроці випробування оцінюють якості процесів керування кожною керованою змінною при наступних сигналах керування поступальним рухом $v = [0 \ 0,5 \ 1 \ -0,5 \ -1]$.

На другому кроці випробування оцінюють якості процесів керування при одночасній стабілізації курсу та глибини занурення корпусу прив'язного підводного апарата.

Критерії якості повинні бути визначені для декількох комбінацій амплітуд $u_{\varphi.r}$ та $u_{h.r}$ і наборі сигналів керування поступальним рухом $v = [0 \ 0,5 \ 1 \ -0,5 \ -1]$.

По закінченні проведення випробування за формулою (5) розраховують середні значення критеріїв якості.

Виконаємо оцінювання якості процесу траєкторного руху. Сигнал керування в даному випробуванні представлено матрицею $U = \begin{bmatrix} \varphi_{r.ref} & h_{r.ref} & t_{\varphi.r} & t_{h.r} & v \end{bmatrix}$, де $\varphi_{r.ref}$, $h_{r.ref}$, $t_{\varphi.r}$, $t_{h.r}$, v –

вектори-стовпці відповідно заданих кутів курсу, $^{\circ}$; заданих глибин занурення, м; тривалостей утримання заданих кутів курсу, с; тривалостей утримання заданих глибин занурення, с; сигналів керування поступальним рухом, ум. од.

Для проведення випробування вибирають район з глибиною з глибиною 1,5–2,5 метрів.

Експеримент виконують за наступним алгоритмом:

- 1) встановити БСППА у вихідне положення;
- 2) задати матрицю вхідних сигналів U та увімкнути режим траєкторного руху ПА;
- 3) по завершенні траєкторного руху перевести керування до ручного режиму;
- 4) зберегти залежності $\varphi_r(t)$ та $h_r(t)$;
- 5) на кожній прямолінійній ділянці траєкторії (визначається рядком матриці U) для курсу та глибини визначити час перехідного процесу $t_{p\varphi,r}$ та $t_{ph,r}$, а також середньоквадратичні відхилення курсу (σ_{φ}) та глибини занурення (σ_h) за виразом (3.17);
- 6) повторити виконання пп. 2-6 2-4 рази;
- 7) повторити виконання пп. 1-7 для траєкторій трьох різних видів.

Розглянемо тепер узагальнену методику проведення морських натурних випробувань безекіпажних буксированих прив'язних підводних апаратів.

В процесі випробувань таких апаратів виконуються наступні роботи:

- 1) перевірка регулятора крену;
- 2) перевірка регулятора диференту;
- 3) перевірка регулятора глибини занурення.

Умовні позначення для керованих змінних та критеріїв якості, які визначаються в ході морських натурних випробувань безекіпажних буксированих прив'язних підводних апаратів (ББПА) представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Умовні позначення для керованих змінних та критеріїв якості процесів керування рухом ББПА

Найменування величини	Вид змінної та одиниці виміру					
	Крен	Од. вим.	Дифе- рент	Од. вим.	Гли- бина	Од. вим.
1	2	3	4	5	6	7
Миттєве значення	θ_t	°	ψ_t	°	h_t	м
Задане значення	$\theta_{t.ref}$	°	$\psi_{t.ref}$	°	$h_{t.ref}$	м

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7
Середнє значення	$\theta_{t.m.st.}$	°	$\psi_{t.m.st.}$	°	$h_{t.m.st.}$	м
Максимальне значення	$\theta_{t.max}$	°	$\psi_{t.max}$	°	$h_{t.max}$	м
Початкове значення	θ_{t0}	°	ψ_{t0}	°	h_{t0}	м
Статична похибка	$\varepsilon_{s\theta.t}$	°	$\varepsilon_{s\psi.t}$	°	$\varepsilon_{sh.t}$	м
Перерегулювання	$M_{\theta.t}$	%	$M_{\psi.t}$	%	$M_{h.t}$	%
Динамічна похибка	$\varepsilon_{d\theta.t}$	%	$\varepsilon_{d\psi.t}$	%	$\varepsilon_{dh.t}$	%
Обмеження відхилення в усталеному режимі	$\delta_{\theta.t}$	%	$\delta_{\psi.t}$	%	$\delta_{h.t}$	%
Тривалість перехідного процесу	$t_{p\theta.t}$	с	$t_{p\psi.t}$	с	$t_{ph.t}$	с
Час зростання	$t_{r\theta.t}$	с	$t_{r\psi.t}$	с	$t_{rh.t}$	с

Для випробувань вибирають район з глибиною 8-10 метрів.

Випробування для кожної з керованих змінних проводиться за єдиним алгоритмом:

1) досягти заздалегідь визначеної усталеної швидкості руху судна-буксирувальника ББППА v_{sv} ;

2) досягти глибини занурення ББППА 1-2 метри;

3) задати амплітуду сигналу керування $u_i = p_{t.ref.t} - p_{t0.i}$ та ввімкнути необхідний режим стабілізації;

4) дочекатись моменту виходу процесів керування в усталений режим (коливання керованої змінної повинні знаходитись у межах $[1 - \delta_{p.t.i}; 1 + \delta_{p.t.i}] \cdot p_{ref.t.i}$);

5) якщо переходу до усталеного режиму не відбувається, внести зміни до налаштувань системи керування та повторити пп. 2-3;

6) утримувати ББППА в усталеному режимі впродовж заздалегідь встановленого періоду t_{st} ;

7) встановити приводи елевона ББППА у вихідне положення;

8) перевести систему керування рухом апарата до ручного режиму;

9) зберегти залежності керованих змінних від часу $p_{t,i}(t)$ та обчислити значення критеріїв якості процесів керування за формулами (1)-(3);

10) у разі виникнення в процесі стабілізації керованої змінної зовнішніх збурень, визначити амплітуди збурень u_d , перерегулювання M_d , тривалості процесів компенсації збурень t_d , статичні (ϵ_{sd}) та динамічні (ϵ_{dd}) похибки регулювання керованої змінної після переходу процесу до усталеного режиму за формулами (1)-(3);

11) повторити виконання пп. 2-10 2-4 рази;

12) змінюючи амплітуди сигналів керування в діапазоні $[u_{i_{\min}}; u_{i_{\max}}]$ з певними кроками Δu_i , повторити виконання пп. 2-11;

13) повторити виконання пп. 1-12 для трьох різних значення швидкості руху судна-буксирувальника ББПА v_{sv} .

4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ МОРСЬКИХ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ БЕЗЕКІПАЖНИХ АВТОНОМНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

Морські натурні випробування безекіпажних автономних підводних апаратів виконуються для перевірки алгоритмів їх узгодженого руху у складі групи. Особливістю такого руху є необхідність утримання кожним з АПА безпечної дистанції між сусідніми апаратами у заданому діапазоні, коли мінімальна дистанція між ними не створює загроз аварійного зіткнення (режим адгезії), а максимальна дистанція гарантує збереження групи та не створює загроз «розпорошення», тобто відходу окремого АПА від групи на дистанцію, коли його сенсори втрачають контакт з сусідніми апаратами (режим когезії).

Натурні морські випробування АПА включають наступні кроки:

- 1) перевірка регулятора курсу;
- 2) перевірка регулятора дистанції.

Умовні позначення для керованих змінних та критеріїв якості, які визначаються в ході морських натурних випробувань АПА представлено в табл. 4.

4.1 Перевірка регулятора курсу

Для випробувань вибирають район з глибиною 1,5-2,5 метри. Оцінювання якості процесу стабілізації курсу виконується при відсутності поступального руху корпусу АПА та за його наявності. Випробування проводять за наступним алгоритмом:

1) встановити АПА у вихідне положення;

2) задати амплітуду сигналу керування $u_i = \varphi_{a.ref.i} - \varphi_{a0.i}$

та ввімкнути режим стабілізації курсу;

Таблиця 4 – Умовні позначення для керованих змінних та критеріїв якості процесів керування рухом АПА

Найменування величини	Вид змінної та одиниці виміру			
	Курс	Одиниці виміру	Дистанція	Одиниці виміру
1	2	3	4	5
Миттєве значення	φ_a	°	d_a	м
Задане значення	$\varphi_{a.ref}$	°	$d_{a.ref}$	м
Середнє значення	$\varphi_{a.m.st.}$	°	$d_{a.m.st.}$	м
Максимальне значення	$\varphi_{a.max}$	°	$d_{a.max}$	м

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5
Статична похибка	$\varepsilon_{sp.a}$	°	$\varepsilon_{sd.a}$	м
Перерегулювання	$M_{\varphi.a}$	%	$M_{d.a}$	%
Динамічна похибка	$\varepsilon_{d\varphi.a}$	%	$\varepsilon_{dh.a}$	%
Обмеження відхилення в усталеному режимі	$\delta_{\varphi.a}$	%	$\Delta_{d.a}$	%
Тривалість перехідного процесу	$t_{p\varphi.a}$	с	$t_{pd.a}$	с
Час зростання	$t_{r\varphi.a}$	с	$t_{rd.a}$	с

3) дочекатись моменту виходу процесів керування в усталений режим (коливання курсу повинні знаходитись у межах $[1 - \delta_{\varphi.a.i}; 1 + \delta_{\varphi.a.i}] \cdot \varphi_{a.ref.i}$);

4) якщо переходу до усталеного режиму не відбувається, внести зміни до налаштувань системи керування та повторити пп. 2-3;

5) утримувати АПА в усталеному режимі впродовж заздалегідь встановленого періоду t_{st} ;

6) перевести систему керування рухом апарата до ручного режиму;

7) зберегти залежність курсу АПА від часу $\varphi_{a,i}(t)$ та обчислити значення критеріїв якості процесів керування за формулами (1)-(3);

8) у разі виникнення в процесі стабілізації керованої змінної зовнішніх збурень, визначити амплітуди збурень u_d , перерегулювання M_d , тривалості процесів компенсації збурень t_d , статичні (ε_{sd}) та динамічні (ε_{dd}) похибки регулювання керованої змінної після переходу процесу до усталеного режиму за формулами (1)-(3);

9) довільним чином встановити корпус АПА в нове положення;

10) повторити виконання пп. 2-8 2-4 рази;

11) змінюючи амплітуди сигналів керування в діапазоні $[u_{i_{\min}}; u_{i_{\max}}]$ з певними кроками Δu_i , повторити виконання пп. 1-10.

Керування поступальним рухом апарата здійснюється сигналом v , який може приймати значення з діапазону $[-1; 1]$. Нижня межа даного діапазону відповідає максимальному значенню сигналу керування для руху апарата назад, а верхня – максимальному значенню сигналу для руху вперед.

Якості процесів керування курсом оцінюють при наступних сигналах керування поступальним рухом

$v = [0 \ 0,5 \ 1 \ -0,5 \ -1]$. По закінченні проведення випробування за формулою (5) розраховують середні значення критеріїв якості.

4.2 Перевірка регулятора дистанції

Для випробувань вибирають район з глибиною 1,5-2,5 метри. В якості сусіднього апарата використовують БСППА або радіокеровану модель. Випробування проводять за наступним алгоритмом:

- 1) встановити АПА у вихідне положення;
- 2) розмістити сусідній апарат за межами досяжності сенсорів дистанції АПА;
- 3) задати значення керованих змінних $\varphi_{a.ref.i}$ та $d_{a.ref.i}$ дочекатись виходу процесу керування кусом АПА в усталений режим (коливання курсу повинні знаходитись у межах $[1 - \delta_{\varphi.a.i}; 1 + \delta_{\varphi.a.i}] \cdot \varphi_{a.ref.i}$);
- 4) спрямувати сусідній апарат в напрямку руху АПА та підвести його з борту АПА, на якому розташовано сенсори на дистанцію $d_{a0.i} \neq d_{a.ref.i}$;

5) дочекатись моменту виходу процесів керування в усталений режим (коливання керованих змінних повинні знаходитись у межах $\left[1-\delta_{p.a.i}; 1+\delta_{p.a.i}\right] \cdot p_{a.ref.i}$);

6) якщо переходу до усталеного режиму не відбувається, змінити налаштування системи керування та повторити пп. 1-5;

7) утримувати АПА в усталеному режимі впродовж заздалегідь встановленого періоду t_{st} ;

8) перевести систему керування рухом апарата до ручного режиму;

9) зберегти залежності керованих змінних від часу $p_{a.i}(t)$ та обчислити значення критеріїв якості процесів керування за формулами (1)-(3);

10) у разі виникнення в процесі стабілізації керованих змінних зовнішніх збурень, визначити амплітуди збурень u_d , перерегулювання M_d , тривалості процесів компенсації збурень t_d , статичні (ϵ_{sd}) та динамічні (ϵ_{dd}) похибки регулювання керованих змінних після переходу процесу до усталеного режиму за формулами (1)-(3);

11) повторити виконання пп. 1-10 2-4 рази;

12) змінюючи початкову дистанцію між АПА та сусіднім об'єктом в діапазоні $[d_{a0.i.min}; d_{a0.i.max}]$ з певними кроками $\Delta d_{a0.i}$, повторити виконання пп. 1-11;

13) повторити виконання пп. 1-12 при сигналах керування поступальним рухом АПА $v = [0 \ 0,5 \ 1 \ -0,5 \ -1]$;

14) повторити виконання пп. 1-13 при трьох різних значеннях заданого курсу руху АПА $\phi_{a.ref}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Воєнна доктрина України. Затверджено Указом Президент України від 24 вересня 2015 року № 555/2015.
2. U.S. Navy. The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan Paperback – December 9, 2014.
3. Rowinski, L. Pojazdy glebinowe. Budowa i wyposazenie [Text] / L. Rowinski. – Gdansk: Przedsiębiorstwo Prywatne “WiB”, 2008. – 593 p.
4. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В.М. Ильюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков, В.И. Силков, О.В. Соловьев, В.И. Стрельников; Под общ. Ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.
5. Блінцов В. С. Сучасні задачі автоматизації керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм [Текст] / В. С. Блінцов, А. С. Сірівчук // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2017. – № 3 (470). – С. 56–63.
6. Блінцов, В.С. Підводна роботизована технологія установки корисного вантажу на морське дно [Текст] / В.С. Блінцов, А.М. Войтасик // Міжнародний науково-виробничий журнал «Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія» – К.: КНУБА №4, 2016. – С. 50-59.

7. Blintsov, O. Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 9. – P. 4–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93291

8. Blintsov, O. Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 7. – P. 4–14. doi: 10.15587/1729-4061.2017.90291

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Математичні моделі вартості та термінів створення автономного підводного апарата з радіобуєм	4
2 Математичні моделі обсягів робіт при створенні прив'язного підводного апарата корабельного базування ...	12
3 Методики морських натурних випробувань безекіпажних автономних та прив'язних підводних апаратів спеціального призначення	21
3.1 Критерії, за якими оцінюється якість процесів керування рухом підводних апаратів	21
3.2 Методика проведення морських натурних випробувань безекіпажних самохідних прив'язних підводних апаратів	30
4 Методика проведення морських натурних випробувань безекіпажних автономних підводних апаратів	40
4.1 Перевірка регулятора курсу	41
4.2 Перевірка регулятора дистанції	44
Перелік посилань	47

ДЛЯ НОТАТОК

This image shows a single page of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical margin lines, text, or other markings on the page.

[illegible]

Навчальне видання

Г. В. БАБКІН, Ж. Ю. БУРУНІНА,
А. М. ВОЙТАСИК, О. П. КЛОЧКОВ,
В.І. КОРИЦЬКИЙ, А. С. СІРІВЧУК

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ БУДІВНИЦТВА
БЕЗЕКІПАЖНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ**

Під редакцією д.т.н. проф. В.С. Блінцова
Комп'ютерне верстання А. С. Сірівчук

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

Формат 80x84/16. Ум. друк. арк. 6,6. Тираж 100 прим. Зам. № 126.
Видавець і виготовник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.