

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ З РАДІОБУЄМ

Монографія

*За редакцією доктора технічних наук,
професора В. С. Блінцова*

Миколаїв
«Іліон»
2022

УДК 681.5:629.584

А 22

РЕЦЕНЗЕНТИ :

Ю. Д. ЖУКОВ, завідувач кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д-р техн. наук, професор;

А. С. КУЛІК, професор кафедри систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д-р техн. наук, професор

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова*

Автоматизація керування автономним ненаселеним
А 22 підводним апаратом з радіобуєм : монографія /
В. С. Блінцов, А. С. Сірівчук, А. В. Надточий, В. А. Надточій ;
за ред. В. С. Блінцова. — Миколаїв : Іліон, 2022. — 196 с.

ISBN 978-617-534-683-9

У монографії викладено загальні відомості про автономні ненаселені підводні апарати, які мають у своєму складі буксирувані радіобуї для оперативного зв'язку з береговим центром керування. Наведено відомості про математичне моделювання системи «автономний ненаселений підводний апарат – кабель-буксир – радіобуй» та описано результати синтезу їх систем автоматичного керування.

Для наукових співробітників, спеціалістів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів, які досліджують, проектують та вивчають засоби підводної робототехніки.

УДК 681.5:629.584

ISBN 978-617-534-683-9

© Блінцов В. С., Сірівчук А. С.,
Надточий А. В., Надточий В. А., 2022

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
Розділ 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ З РАДІОБУЄМ	
1.1 Коротка характеристика систем зв'язку з підводними апаратами	10
1.2 Огляд та аналіз сучасних автономних ненаселених підводних апаратів з радіобуями	14
1.3 Основні завдання АНПА-РБ на мілководних акваторіях України у сучасних умовах	35
1.4 Аналіз ефективності використання автономних підводних апаратів з радіобуями	42
1.5 Автономний підводний апарат з радіобуєм як об'єкт керування	48
1.6 Аналіз систем автоматичного керування підводними апаратами	50
1.7 Концепція побудови системи керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм	52
Розділ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ «АВТОНОМНИЙ НЕНАСЕЛЕНИЙ ПІДВОДНИЙ АПАРАТ – КАБЕЛЬ-БУКСИР – РАДІОБУЙ»	
2.1 Розробка структури математичної моделі	64
2.2 Опис систем координат	67
2.3 Динаміка руху АНПА-РБ	73
2.4 Розробка комп'ютерної імітаційної моделі системи	83
Розділ 3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВИКОНАВЧОГО РІВНЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ	
3.1 Аналіз та обґрунтування задач виконавчого рівня	87
3.2 Синтез системи автоматичного керування кабельною лебідкою	90
3.3 Синтез системи стабілізації диференту АНПА	97

3.4	Синтез системи автоматичного керування плоским вертикальним рухом АНПА-РБ	103
3.5	Експериментальне дослідження регулятора курсу підводного апарату	116
Розділ 4	РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРІВ ТАКТИЧНОГО РІВНЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ	
4.1	Синтез системи автоматичного позиціонування підводного апарата в робочій точці	122
4.2	Робота тактичного рівня системи автоматичного керування підводним апаратом у режимі траєкторного руху	132
4.3	Порівняння з існуючими системами автоматичного керування	139
Розділ 5	ПРОЕКТНІ РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ БУКСИРУВАНОГО РАДІОБУЯ	
5.1	Особливості проектних розрахунків буксированого радіобуя	141
5.2	Дослідження експлуатаційних характеристик АНПА-РБ в режимах підйому-спуску радіобуя	144
5.3	Вплив заглиблення радіобуя на його експлуатаційні характеристики	148
5.4	Методика розрахунку зміни довжини попущеної частини КБ для стабілізації підповерхневого руху РБ	150
5.5	Методика розрахунку компенсуючого моменту ХО для стабілізації підповерхневого руху РБ	152
5.6	Стійкість квазістаціонарного руху АНПА-РБ	153
5.7	Узагальнений алгоритм проектних розрахунків АНПА-РБ	160
	ВИСНОВКИ	167
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	169
	ДОДАТКИ	178
Додаток А	Програма і методика морського натурного експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм	178
Додаток Б	Порядок проведення морських дослідницьких випробувань діючого макету радіобуя проекту «Арго-Буй»	192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АНПА.....	автономний ненаселений підводний апарат
АНПА-РБ ...	автономний ненаселений підводний апарат з буксируванням радіобуєм
БКНО.....	блок керування навіного обладнання
БОД.....	блок обробки даних
БП.....	блок плавучості
БПА.....	буксирований підводний апарат
БПК.....	береговий пост керування
БСК.....	базова система координат
ВШ.....	регулятор вертикальної швидкості
ГГ.....	гребний гвинт
ГО.....	гідродинамічний опір
ГК.....	гідродинамічне крило
ГР.....	горизонтальні рулі
ЕД.....	електродвигун
ЕРП.....	електрорушійний пристрій
ДП.....	діаметральна площа
ЗЗ.....	зовнішні збурення
ЗСК.....	зв'язана система координат
ІК.....	інтерфейс користувача
КАС.....	контрольно-аварійна система
КБ.....	кабель-буксир
КВ.....	корисний вантаж
КЛ.....	кабельна лебідка
КР.....	крило
КСК.....	кабельна система координат

МКНО модуль керування начіпного обладнання
ММ математична модель
МРКР модуль ручного керування рухом
МШ..... регулятор маршової швидкості
НП..... несуча поверхня
ПА..... підводний апарат
ПВР плоский вертикальний рух з поворотом
ППС прив'язна підводна система
РБ..... радіобуй
РК регулятор курсу
РКК..... рушійно-кермовий комплекс
РМ регулятор маршового руху
РН регулятор напрямку
РП розподілення потужності
САК система автоматичного керування
СГ..... стабілізатор глибини
СК система координат
СПК..... судновий пост керування
СПМ система постановки місії
СПРТ система позиціонування в робочій точці
ССД..... система стабілізації диференту
ССМ..... система слідування місії
ХО хвостове оперення
ХС..... хвостовий стабілізатор

ВСТУП

Україна як морська держава володіє морськими територіальними водами та внутрішніми водами, які мають вихід в Азово-Чорноморський басейн. Вказані акваторії активно використовуються в різних сферах діяльності держави, зокрема, у видобувній, природоохоронній, рекреаційній та оборонній тощо.

Використання територіальних вод вимагає постійного висвітлення підводної обстановки на акваторіях зі значною площею і, в першу чергу, на акваторіях, які активно використовуються: торговельних портах, рекомендованих водних транспортних шляхах, акваторіях з морськими трубопроводами та іншими інженерними спорудами.

Наразі Україна має фактичні територіальні води з глибиною до 100 м. Господарська та природоохоронна діяльність держави саме на цих акваторіях має найбільший пріоритет.

Світова практика свідчить, що найбільш ефективними засобами висвітлення підводної обстановки є підводні апарати-роботи, оскільки вони мають низку переваг: тривалий час роботи, можливість використання при несприятливих погодних умовах та на небезпечних акваторіях, оперативність підготовки до роботи та безпека для людського життя.

У розвинених морських державах для дослідження підводної обстановки широко застосовують автономні ненаселені підводні апарати. Основним недоліком застосування такого виду підводної робототехніки є те, що інформаційний обмін з постом керування підводною місією здійснюється лише після завершення місії або з заданим періодом, при якому виникає необхідність спливання апарата на поверхню.

У монографії розглядається новий вид автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм (АНПА-РБ) як засіб висвітлення підводної обстановки на мілководних акваторіях. Такий підводний апарат не потребує спливання на поверхню для передачі інформації, оскільки має двохсторонній канал зв'язку з береговим центром керування в режимі реального часу.

На сьогодні АНПА-РБ є найбільш ефективним засобом для автоматизованого висвітлення підводної обстановки на мілководних акваторіях, оскільки дає змогу виконувати як довготривале функціонування на акваторіях, так і оперативне обстеження виявлених підводних потенційно небезпечних об'єктів. Тому автоматизація даного об'єкта керування є актуальною прикладною науковою задачею, успішний розв'язок якої обумовить підвищення ефективності використання державою територіального моря і внутрішніх вод.

Автоматизація рухомих об'єктів завжди знаходилася в центрі уваги вітчизняних та зарубіжних науковців. Вагомі результати отримано в роботах академіка НАН України Кунцевича В. М., професорів Вагуценка Л. Л., Гостєва В. І., Збруцького О. В., Казака В. М., Клепікова В. Б., Кондратенка Ю. П., Куліка А. С., Тимченка В. Л., Цимбала М. М. (Україна), Wadoo S., Pushkin K., Button R. W., Kamp J., Curtin T. B. (США), Eichhorn (Німеччина), Londhe P. S. (Індія).

Однак специфіка функціонування АНПА-РБ вимагає додаткових досліджень, пов'язаних зі створенням систем автоматичного керування (САК), які б враховували спільну роботу власне автономного ненаселеного підводного апарата, його кабельної лебідки та радіобуя.

Особливо важливим аспектом автоматизації керування АНПА-РБ є забезпечення енергоефективності, яка безпосередньо впливає на тривалість його підводної місії. Значна кількість енергії акумуляторних джерел АНПА-РБ витрачається на подолання гідродинамічного опору рухові його корпусу.

Крім того, буксирований радіобуй створює додатковий гідродинамічний опір, який передається на корпус АНПА-РБ через кабель-буксир та створює негативний диферентуючий момент. Стабілізацію диферента апарата пропонується забезпечити використанням горизонтальних рулів, оскільки такий спосіб є найменш енерговитратним. Але відомі системи стабілізації диференту на основі горизонтальних рулів не забезпечують необхідних показників якості керування в усіх режимах руху самохідних підводних апаратів.

Вибір конструкції рушійно-кермового комплексу обумовлений необхідністю забезпечення руху апарата в тривимірному просторі з найменшою кількістю виконавчих механізмів. Але для даної конструкції рушійно-кермового комплексу необхідна розробка додаткових багатофункціональних САК для забезпечення вимог, які висуваються до АНПА-РБ при вирішенні задач стабілізації в робочій точці, траєкторного руху, патрулювання на захищених акваторіях та оперативного обстеження підводних потенційно небезпечних об'єктів.

Оскільки більшість збурень, які впливають на рух АНПА-РБ, мають невизначений характер, а їх вимірювання є складною технічною задачею, для синтезу елементів САК використано методи нечіткої логіки.

Розділ 1

ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ АВТОНОМНИХ НЕНАСЕЛЕНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ З РАДІОБУЄМ

1.1 Коротка характеристика систем зв'язку з підводними апаратами

Швидкий розвиток підводних технологій ставить перед розробниками засобів підводної робототехніки (ЗПР) низку прикладних наукових завдань, від успішного розв'язку яких залежить ефективність проведення підводних місій. Одним з таких завдань є забезпечення високоякісного та швидкісного інформаційного обміну між ЗПР та стаціонарним чи мобільним центром керування підводною місією (ЦКПМ), який зазвичай знаходиться на судні забезпечення. Такий зв'язок необхідний як для оперативного керування місією ЗПР, так і для передачі інформації про його позиціонування, передачі фото- та відеоінформації про параметри підводного середовища, про виконання інспекції підводних об'єктів тощо.

Зв'язок має бути завадостійким та забезпечувати обмін інформацією у реальному часі між ЗПР і ЦКПМ та між ЗПР при їх груповому використанні.

На цей час найбільшого розповсюдження набули наступні варіанти реалізації інформаційного обміну з ЗПР [1]:

- зв'язок по гідроакустичному каналу, який реалізується гідроакустичними модемами різних типів [2];
- зв'язок по оптичному каналу [3];
- зв'язок по каналу, побудованому на принципі магнітної індукції [4];

- зв'язок, побудований на основі застосування електромагнітних сигналів радіочастотного діапазону [5];
- зв'язок по провідному каналу (за допомогою важких електричних кабелів-тросів [6] чи легких та тонких волоконно-оптичних кабелів [7];
- комбінації зазначених вище варіантів підводних комунікацій з метою перенесення інноваційної концепції Інтернету речей (Internet of Things, IoT) на комунікації у морському середовищі та побудови Інтернету підводних речей – Internet of Underwater Things (IoUT) [8].

Перші чотири варіанти реалізації зв'язку широко використовуються для керування та зв'язку з автономними ненаселеними підводними апаратами (АНПА, в англomовній літературі – Autonomous Underwater Vehicle, AUV). Їх головною перевагою є відсутність гнучкого кабельного зв'язку ЗПР з судном забезпечення, що дає змогу виконувати підводні місії на великих за площами акваторіях і знижує загальні витрати на їх виконання.

Недоліком першого варіанту є наявність великих затримок при розповсюдженні сигналів через те, що швидкість звуку у воді у багато тисяч разів нижча за швидкість електромагнітних хвиль у повітрі. Це обумовлює низьку пропускну здатність каналів зв'язку, що обмежує кількість інформації, яка циркулює між АНПА та ЦКПМ. Крім того, гідроакустичний канал зв'язку погано працює на мілководді та у прибережній зоні, оскільки тут проявляються негативні явища з-за багатократного відбиття акустичного сигналу від ґрунту та від водної поверхні. Додаткові завади породжуються хвилюванням поверхні моря.

Другий варіант підводного зв'язку реалізується з використанням лазерних діодів або світлодіодів для зв'язку між абонентами (АНПА). Оптичний зв'язок забезпечує набагато вищу швидкість передачі даних і меншу затримку у часі, ніж акустичний зв'язок, але діапазон його застосування обмежений лише дистанцією прямої видимості та прозорістю водного середовища.

Третій варіант підводного зв'язку реалізується за допомогою магнітної індукції і використовує магнітні котушки для генерування інформаційних сигналів. Хоча цей метод зв'язку має майже нульову затримку розповсюдження, діапазон його застосування дуже обмежений з-за необхідності мати потужні бортові джерела електромагнітних випромінювань.

Четвертий варіант підводного зв'язку практично не застосовується з-за швидкого згасання електромагнітних (радіочастотних) сигналів у воді. Виключення складають буксирувані низькочастотні кабелі-антени великої довжини, які буксируються підводними апаратами по водній поверхні.

П'ятий варіант підводного зв'язку є основним для керування прив'язними підводними апаратами (ППА, в англійській літературі – Remotely Operated Vehicle, ROV), його особливістю є наявність гнучкого кабельного зв'язку у вигляді електричного кабель-тросу (КТ, в англійській літературі – Tether Cable, TC). Зазвичай, одночасно з інформаційним обміном електричні кабелі використовують також для енергоживлення ППА та для забезпечення його механічного зв'язку з судном-носієм. Цей варіант забезпечує керування підводною місією ППА у режимі реального часу, однак наявність КТ кінцевої довжини обмежує маневрування підводного апарата та радіус його робочої зони (невеликі віддалення від судна забезпечення).

Шостий варіант підводного зв'язку є складовою інноваційного підходу до побудови Інтернету підводних речей, що передбачає залучення різноманітних технологій морського зв'язку на основі гідроакустики та радіотехніки, оптичних хвиль і магнітної індукції. Цей новий фреймворк об'єднує та підтримує численні програми, зокрема екологічне та археологічне дослідження океану, надводну та підводну навігацію, визначення місця розташування та контроль забруднення навколишнього середовища, програми з техногенної, транспортної та воєнної безпеки океану. Інтернет підводних речей відкриває новий етап застосування

інформаційних технологій у напрямку створення й дослідження баз даних і баз знань про океани. На цей час Інтернету підводних речей знаходиться на початковій стадії свого розвитку і вимагає виконання прикладних науково-технічних розробок у частині створення ефективних стаціонарних та мобільних сенсорів як інформаційної основи для його успішного функціонування.

Таким чином, виконаний короткий аналіз характеристик систем зв'язку з підводними апаратами свідчить, що на сьогодні існує усталена інженерно-конструкторська думка щодо доцільності застосування тих чи інших систем підводного зв'язку:

- для АНПА доцільно використовувати перші чотири варіанти побудови систем зв'язку і керування ЗПР, які дають змогу виконувати підводні місії на великих відстанях від судна забезпечення (у тому числі й на великих глибинах) та мають обмеження щодо реалізації режимів керування підводними місіями у реальному часі;
- для ППА доцільно використовувати п'ятий варіант побудови системи зв'язку і керування, який забезпечує ідеальні умови для керування підводними місіями ЗПР у реальному часі, однак має суттєві обмеження щодо віддалення від судна забезпечення, пов'язаними з обмеженою довжиною кабель-тросу.

Разом з тим, розвиток програмно-технічних засобів систем зв'язку останнім часом дає змогу поєднати переваги четвертого і п'ятого варіантів підводного зв'язку, а саме, об'єднати в єдиній системі переваги кабельного та радіозв'язку. Підводні апарати з такими системами зв'язку мають у своєму складі окремий зовнішній радіобуй, який під час роботи системи зв'язку буксирується по морській поверхні й забезпечує радіообмін інформацією між ЗПР та ЦКПМ.

Нижче наводяться основні схеми побудови АНПА з радіобуями та аналізуються області їх застосування.

1.2 Огляд та аналіз сучасних автономних ненаселених підводних апаратів з радіобуями

Типовий автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм (АНПА-РБ), у загальному випадку, являє собою власне АНПА, оснащений буксируваним під поверхнею води радіобуєм зв'язку (РБ) та обладнанням, необхідним для його випуску на поверхню моря, проведення сеансу двостороннього зв'язку з ЦКПМ та прийому на борт АНПА після закінчення сеансу радіозв'язку (рис. 1.1).

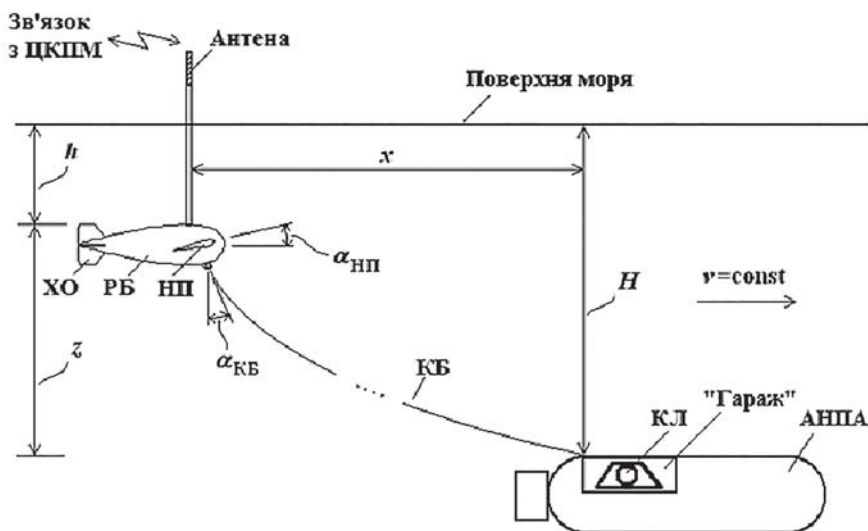


Рисунок 1.1 – Схема застосування АНПА-РБ

Конструкція АНПА може передбачати спеціальне місце («гараж») для розташування РБ та механізм для його закріплення «по-похідному», а також лебідку кабель-буксиру (КЛ) з кабель-буксиром (КБ) регульованої довжини, яка випускає КБ для реалізації сеансу зв'язку з урахуванням глибини АНПА.

За конструкцією РБ, зазвичай, являє собою обтічне тіло нульової або додатної плавучості і може мати несучі поверхні (НП)

та хвостове оперення (ХО) для створення, відповідно, додаткової підйомної сили та стабілізуючих моментів.

Очевидно, що застосування АНПА–РБ обмежене невеликими глибинами (зазвичай, не більше 100 метрів), оскільки для більших глибин довжина КБ та, відповідно, масогабаритні характеристики ЛК будуть неприпустимо великими.

Теоретичні питання проектування АНПА–РБ в Україні та світі почалися задовго до побудови реальних зразків такого виду ЗПР [9–11]. Такі дослідження стимулювались бажанням розширити функціональність традиційних АНПА шляхом використання надводного буя-ретранслятора, який забезпечує високошвидкісний канал обміну даними між оператором ЦКПМ та АНПА в режимі реального часу. Крім того, дані приймача супутникової навігаційної системи радіобуя дозволяють виправляти помилки, накопичені бортовою навігаційною системою підводного апарату без використання гідроакустичних навігаційних приладів.

За призначенням сучасні АНПА–РБ укрупнено можна розділити на робочі, зв'язкові, інспекційні та розважальні.

Розглянемо типові конструкції та основні застосування АНПА–РБ.

1.2.1. Прикладом робочого АНПА–РБ є підводний апарат спільного виробництва італійської компанії «Pluto» та швейцарської компанії «idRobotica» [12, 13], рис. 1.2.

На рис. 1.2 зображено: *а* – робочий АНПА–РБ перед зануренням (РБ «Radio buoy» закріплений «по-похідному» у кормовій частині АНПА «Pluto Plus ROV»); *б* – загальний вид РБ; *в* – робоче положення РБ «Radio buoy» під час буксирування підводним апаратом «Pluto Plus ROV».

Розглянемо основні складові зазначеного АНПА–РБ.

Як було зазначено вище (рис. 1.1), АНПА–РБ складається з підводного апарата-робота «Pluto Plus ROV» та буксируваного радіобуя «Radio buoy».

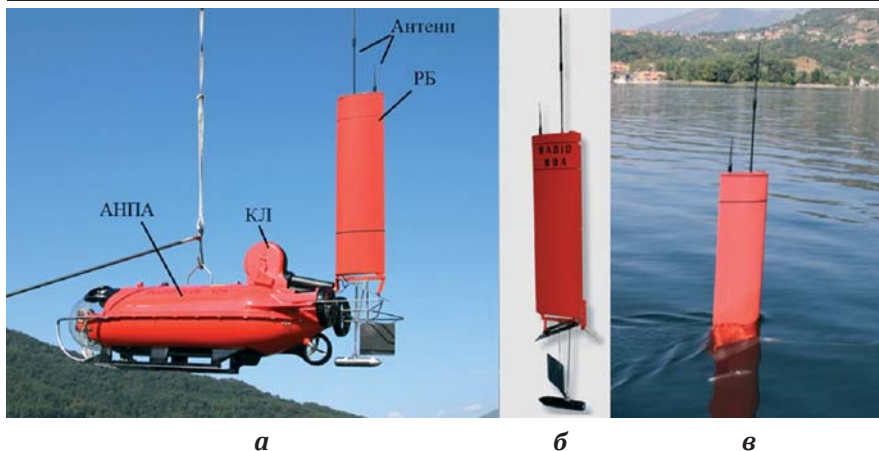


Рисунок 1.2 – Склад обладнання АНПА «Pluto Plus ROV»
з РБ «Radio buoy»

Підводний апарат «Pluto Plus ROV» у базовій комплектації являє собою самохідний прив'язний підводний апарат (в англійській літературі – Remotely Operated Vehicle, ROV) з акумуляторним джерелом живлення. Апарат призначений для виконання широкого спектру підводних робіт – від підводної археології до пошуку та знешкодження морських мін.

Підводний апарат «Pluto Plus ROV» має наступні технічні характеристики:

- габаритні розміри: 2250×580×770 мм;
- власна маса: 320 кг (+ маса корисного вантажу – 100 кг);
- максимальна швидкість: 6 вузлів;
- робоча глибина: 400 м;
- автономність: від 2 до 5 годин (у залежності від швидкості руху).

Підводний апарат має розвинену систему гідролокаторів (дистанція від 0,5 до 300 м) та акустичну камеру для роботи в умовах нульової видимості (діапазон – 0–16 м).

Таким чином, підводний апарат «Pluto Plus ROV» за конструкцією та комплектацією бортового обладнання належить до

типових ППА, керування якими здійснюється у режимі реального часу за допомогою кабель-тросу.

Заміна традиційного КТ для керування ППА на буксируваний радіобуй надає апарату переваги АНПА (відсутність механічного зв'язку з судном забезпечення) та переваги ППА (можливості передачі підводної інформації та оперативного керування апаратом у реальному часі).

РБ «Radio buoy», що входить до складу АНПА-РБ, забезпечує зручний бездротовий зв'язок з ЦКПМ і дає змогу виконувати високоточні підводні місії у реальному часі.

Крім того, наявність РБ суттєво зменшує витрати електроенергії бортових акумуляторів при роботі на максимальних для ППА дистанціях від судна забезпечення (зменшуються витрати на буксирування КБ) та збільшує свободу маневрування підводного апарата при роботі в умовах стисненої підводної навігації.

Радіобуй виконано у формі вертикального крила з мінімальним гідродинамічним опором буксирування та високою остійністю за рахунок використання кіля (рис. 1.2, б).

У комплект радіобуя входять:

- радіобуй з відповідними водонепроникними контейнерами для електроніки та акумуляторного джерела живлення;
- кабель-буксир (КБ), корінний кінець якого закріплений на барабані малогабаритної автоматичної кабельної лебідки (КЛ), яка встановлена на АНПА «Pluto Plus ROV»;
- антени зв'язку і керування (Wi-Fi, радіо, GPS);
- програмний пакет автоматичної навігації.

Радіобуй відстежує сигнали супутникової навігаційної системи GPS і дає можливість визначати підводне положення АНПА і передавати його на ЦКПМ.

РБ «Radio buoy» має наступні технічні характеристики:

- висота: $\approx 2,7$ м;
- маса: ≈ 5 кг;
- радіочастота: УВЧ;
- відео / частота даних: УВЧ;
- позиціонування: GPS;

- керовані системи: сонари та відеокамери;
- дальність дії радіозв'язку: 2000–5000 м;
- довжина кабель-буксиру: 150 м (більше – за запитом);
- камера контролю на поверхні: за необхідністю;
- сенсори безпеки: контроль втрати РБ та затікання води в герметичні модулі електрообладнання.

Таким чином, АНПА «Pluto Plus ROV» з радіобуєм «Radio buoy» є високоефективним робочим АНПА-РБ, який успішно використовується для виконання підводних місій, які не дозволяють використовувати водолазів з таких причин, як вартість, ризику для життя, велика тривалість роботи і т.д.

1.2.2. Підводні радіобуї зв'язкового призначення спершу з'явилися як засоби комунікації підводних човнів (ПЧ) з береговими військово-морськими базами [14; 15]. Вони забезпечували оперативний радіообмін без необхідності сплавати на поверхню моря і, таким чином, гарантували прихованість факту перебування ПЧ, який веде операцію у ворожих водах.

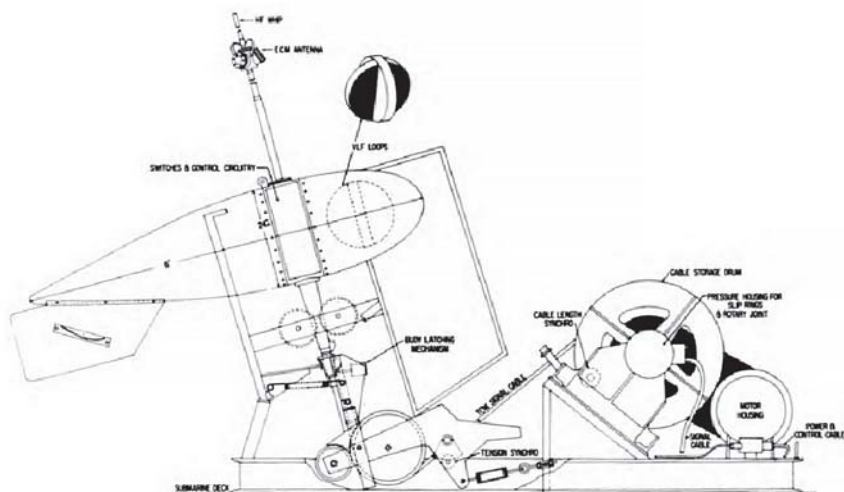
Конструктивно така система зв'язку складалась з розташованих на палубі ПЧ лебідки з кабель-буксиром (КЛ), «гаражу» для зберігання РБ (ГРБ) та механізму утримання та випуску-прийому (МУВП) РБ (рис. 1.3).

Всередині ПЧ знаходилась пост керування системою радіозв'язку. Він містить приладову панель для завдання необхідних режимів роботи, індикатори від сенсорів натягу кабель-буксиру та пристрої для забезпечення безпеки роботи РБ.

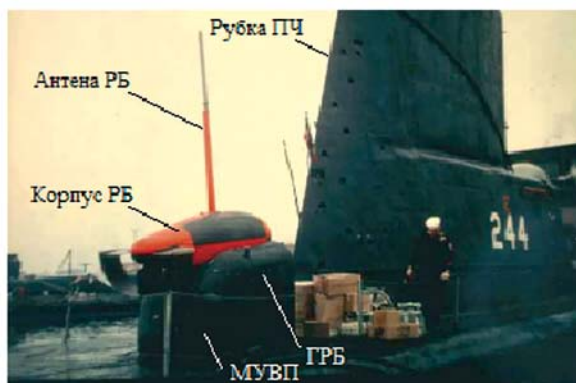
Пост керування має також засоби для контролю поведінки РБ при спливанні та зануренні та русі на поверхні моря.

Іншим прикладом застосування зв'язкових АНПА-РБ для ПЧ є система зв'язку «AN/BSQ-5 Towed Buoy», наведена на рис. 1.4 [15].

Вказана система зв'язку призначена для застосування на атомних ПЧ США і є подальшим розвитком концепції підводних РБ зв'язкового призначення. Конструкція цієї системи зв'язку є більш досконалою, оскільки вона має РБ покращеної гідродинамічної форми для роботи під поверхнею моря для зменшення



а



б

Рисунок 1.3 – Розташування радіобуя зв'язкового призначення
на підводному човні [14]

сліду (реалізується підповерхнєве утримання РБ на заданій глибині від морської поверхні під час його буксирування), антену, яка складається по-похідному, декілька систем радіозв'язку та технічного захисту радіоінформації, приймачі супутникових систем навігації тощо.



Рисунок 1.4 – Система зв'язку «AN/BSQ-5 Towed Buoy»
для атомних підводних човнів SSN «Sturgeon», США (клас 637) [15]

У ході подальшого розвитку ЗПР та розширення наукових досліджень Світового океану в інтересах людства у XXI сторіччі виникла необхідність забезпечувати оперативний зв'язок оселених підводних апаратів (ОПА) цивільного призначення з береговими науковими центрами. Це стимулювало впровадження концепції застосування РБ зв'язкового призначення також і для дослідницьких ОПА різного призначення – природоохоронних, пошуково-дослідницьких та інших.

Прикладом сучасного зв'язкового радіобуя для ОПА цивільного призначення є РБ проекту «Арго-Буй» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, рис. 1.5. Такі РБ використовують у випадках, коли екіпажу ОПА необхідно розв'язувати навігаційні завдання з використанням супутникових та берегових радіонавігаційних систем або/і забезпечувати оперативний зв'язок ОПА з береговою базою без спливання підводного апарату на поверхню моря [16].

До складу системи, яка забезпечує використання РБ за призначенням, входять:

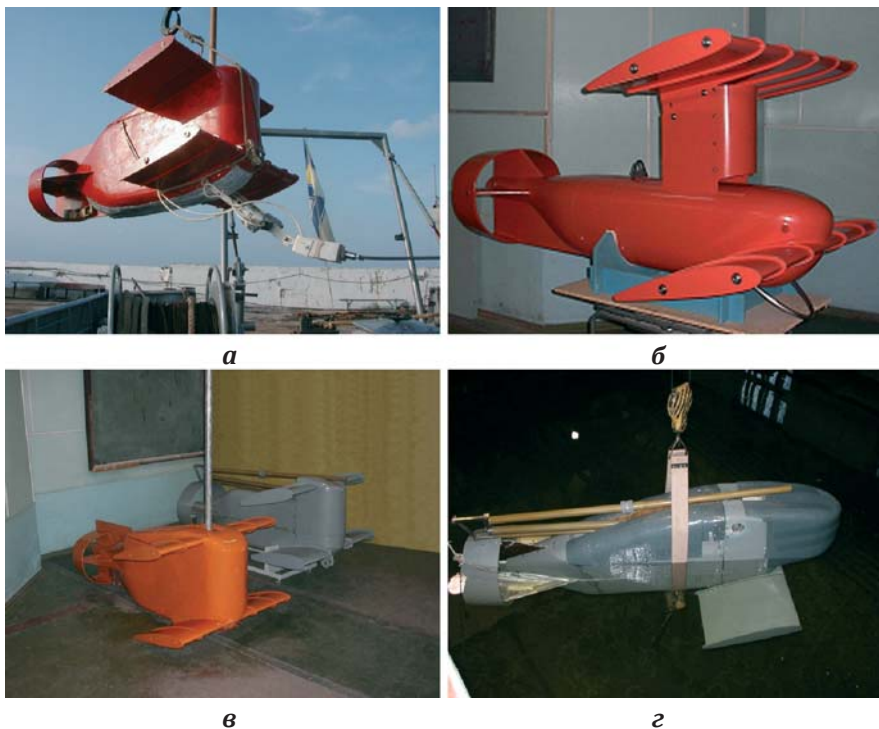


Рисунок 1.5 – Варіанти конструкції зв'язкового радіобуя «Арго-Буй»

- власне РБ як носій корисного вантажу (КВ) – приймально-передаючої і навігаційної апаратури, антен і механізмів їх установки в робоче положення, джерела електроживлення та інтерфейси;
- вантажонесучий кабель-буксир (КБ);
- розташована на ОПА кабельна лебідка (КЛ);
- розташований на ОПА пост енергетики і керування ангаром, КЛ і РБ згідно рис. 1.1.

Для розміщення РБ і його КЛ «по-похідному» на ОПА, як правило, встановлений спеціальний ангар. Управління роботою ангара (випуск і прийом РБ), роботою КЛ і РБ, як правило, ведеться вручну екіпажем ОПА.

Вказані на рис. 1.5 модифікації РБ несуть КВ у таких варіантах:

- транспортують КВ (наприклад, магнітні антени) поверхнею моря або на заданому заглибленні під водною поверхнею, причому КВ знаходиться всередині РБ;
- транспортують КВ (наприклад, штирьові супутникові або радіоантени) над поверхнею моря;
- транспортують КВ (наприклад, протяжні кабельні антени) під поверхнею моря.

Вказані РБ являють собою апарати гідродинамічного कंपонування, які здійснюють підповерхневий рух завдяки дії гідростатичних та гідродинамічних сил. Умови такого руху ускладнюються наявністю зовнішніх вітрово-хвильових збурень та наявністю вільної поверхні води.

Основними завданнями РБ є винесення КВ з глибини ходу ОПА на задану глибину підповерхневого буксирування і забезпечення його стабілізованого підповерхневого руху в умовах зовнішніх збурень вітро-хвильового походження.

Конструктивно варіанти виконання корпусів РБ є гідродинамічно обтічними, всередині якого розміщуються:

- КВ та система керування КВ;
- система керування просторовим рухом РБ;
- допоміжне обладнання (джерела електроживлення, пристрої, що комутують електричні ланцюги РБ).

На корпусі РБ розташовані несучі поверхні (НП) та хвостове оперення (ХО), які створюють підйомну силу та кренодиферентні сили, значення яких є керованими відповідною системою автоматичного керування [17].

Основним завданням КЛ є витравлення КБ необхідної довжини для вільного підйому РБ на необхідну висоту щодо ОПА (на задану глибину підповерхневого руху $h_{РБ}$) під дією гідростатичних та гідродинамічних сил та повернення (спуск) РБ до ОПА.

Додатковим завданням КЛ є відсікання КТ у разі виникнення в ньому зусиль, що перевищують розрахунково припустимі.

Основними функціями ангару є зберігання РБ «по-похідному», випуск РБ для виконання основного завдання та прийом із переведенням у режим «по-похідному» після її завершення.

Виходячи зі складу обладнання та основного призначення системи, що буксирується, мають місце наступні режими роботи ОПА з РБ, важливі для побудови вискоєфективної системи автоматичного керування (САК) нею:

- підготовка до випуску РБ – розкриття ангару, розблокування замкових механізмів кріплення РБ по-похідному; при цьому РБ потрапляє в потік води, що набігає, і на його НП створюється підйомна сила;
- вихід РБ з ангару та відхід від ОПА на задану висоту – відбувається під дією підйомної сили НП та сили плавучості РБ (архімедової сили) шляхом витравлювання КБ завдяки включенню КЛ у режим «попускати» з малою швидкістю;
- підйом РБ на розрахункову робочу висоту відносно ОПА – відбувається після включення КЛ у режим «попускати» з великою швидкістю;
- встановлення в робочий стан зовнішнього КВ - підйом щогл, випуск антен;
- підповерхневе буксирування РБ на заданому заглибленні щодо поверхні моря (у цьому режимі працює КВ РБ);
- встановлення у початковий стан зовнішнього КВ – опускання щогл, змотування довгомірних кабельних антен;
- спуск РБ та підхід до ОПА на задану висоту – відбувається шляхом вибирання КБ після включення КЛ у режим «вибирати» з великою швидкістю;
- підхід РБ до ОПА та вхід до ангару – відбувається шляхом вибирання КБ завдяки включенню КЛ у режим «вибирати» з малою швидкістю;
- підготовка до транспортування РБ «по-похідному» – блокування замкових механізмів кріплення РБ по-похідному, закриття ангару.

Два перші та два останні режими віднесено до підготовчих, а решта – до робочих режимів ОПА з РБ.

Слід зазначити, що застосування РБ в морській практиці здійснюється при рівномірному прямолінійному русі ОПА на незмінній глибині.

Крім того, зовнішній КВ (щогли, антени), що вертикально встановлюються, повинен буксируватися таким чином, щоб його верхня частина знаходилася над поверхнею води.

АНПА-РБ проекту «Арго-Буй» має наступні технічні характеристики:

- максимальна глибина занурення – 600 метрів;
- проектна швидкість буксирування – до 4 м/с;
- габаритні розміри, мм – 1500×1000×800;
- довжина кабель-буксира – 300 метрів;
- маса – 130 кг.

1.2.3. До АНПА-РБ інспекційного призначення можна віднести підводні апарати проектів «АНПА РБ» та «Каліпсо» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова [18].

Автономні підводні апарати проекту «АНПА РБ» призначені для виконання наступних робіт на мілководних акваторіях:

- пошуку підводних об'єктів;
- обстеження донної поверхні акваторій портів та підводних частин суден і гідротехнічних споруд за допомогою відео-, гідроакустичних та магнітометричних приладів;
- виконання простих підводних робіт за допомогою маніпулятора;
- високоякісного документування процесу та результатів підводних робіт.

Завдяки бездротовому зв'язку з пультом керування можливе застосування апарата по всій акваторії порту без використання додаткових плавзасобів.

Зовнішній вигляд підводного апарату проекту «АНПА РБ» наведено на рис. 1.6.

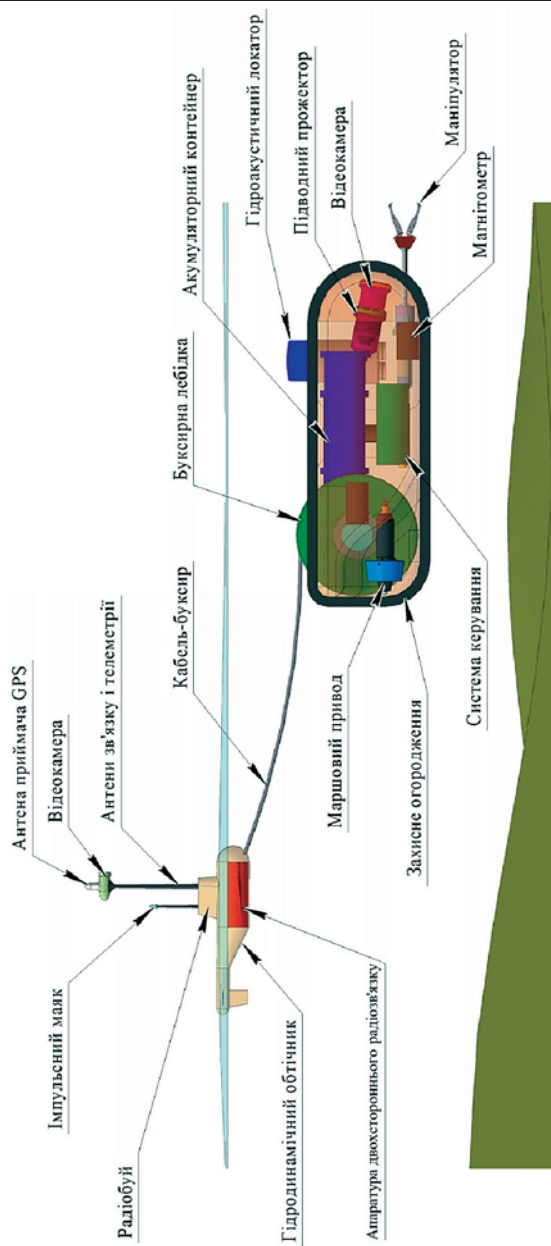


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд підводного апарату проекту «АНПА РБ»

Основні характеристики підводних апаратів проекту «АНПА РБ»:

- максимальна робоча глибина, м25
- габаритні розміри апарату, мм.....850×420×350
- швидкість маршова, вузлів..... 1
- довжина кабель-тросу, м..... до 15
- маса апарату, кг35
- електроживлення акумуляторна батареяLiFePo
- габаритні розміри буя, мм:
 - довжина.....300
 - діаметр.....150
- автономність, годин 2
- керування та телеметрія..... радіоканал
- кількість членів екіпажу, люд. 2
- гідрометеоумови:
 - температура води, град. Цельсію 0 ... +30
 - температура повітря, град. Цельсію..... -20 ... +40
 - вітер, м/с..... до 10
 - водна поверхня, балів до 3

Автономні підводні апарати проекту «Каліпсо» призначені для реалізації неконтактної технології діагностування технічного стану суден, що знаходяться на екологічно захищеній акваторії, а також оцінки наявності передумов до виникнення екологічних подій, пов'язаних з їх аварійним технічним станом.

Зовнішній вигляд АНПА-РБ проекту «Каліпсо» показано на рис. 1.7.

Основна ідея застосування АНПА-РБ проекту «Каліпсо» для виявлення суден, що мають передумови для екологічних подій, полягає в:

- неконтактному зніманні інформації про гідроакустичні шуми механізмів суден (основного теплового двигуна, двигунів суднових допоміжних механізмів тощо), які можна якісно задокументувати, оскільки вони поширюються у водному середовищі з мінімальними втратами;

- оперативній (on-line) передачі задокументованої інформації до ЦКПМ для виявлення передумов виникнення екологічних подій на акваторії.

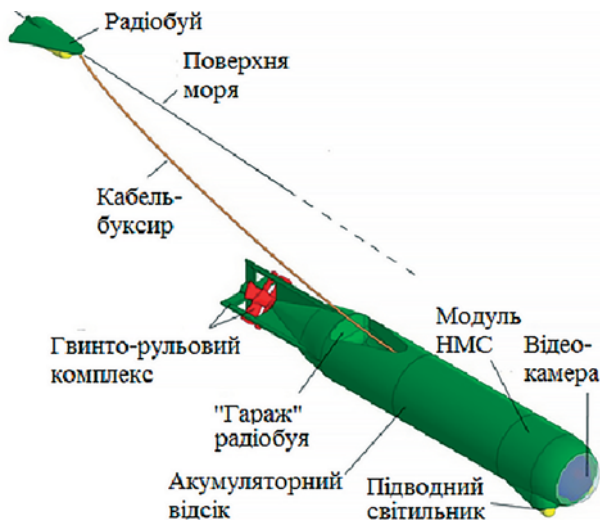


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд АНПА-РБ проекту «Каліпсо»

Береговий ЦКПМ здійснює діагностування суден і, таким чином, дає змогу безперервно відстежувати технічний стан їх механізмів, а також приймати рекомендаційні або директивні рішення (залежно від статусу ЦКПМ) щодо подальшої експлуатації суден на захищеній акваторії.

Зокрема, якщо результати діагностування показують, що технічний стан судна наближається до аварійного, то має бути ухвалено рішення про припинення експлуатації судна або про перехід на полегшений режим з одночасним вжиттям заходів, які забезпечують екологічну безпеку акваторії.

Комплекс технічних засобів проекту «Каліпсо», що реалізує базову технологію виявлення суден, які мають технічні передумови до екологічних подій, включає наступне обладнання:

- береговий ЦКПМ..... 1
- береговий пост запуску АНПА–РБ
для виконання місії та прийому після її завершення
(для кожної захищеної акваторії) 1
- береговий пост технічного обслуговування АНПА–РБ.... 1
- АНПА–РБ проекту «Каліпсо»..... 1

Береговий ЦКПМ призначений для виконання таких основних робіт:

- планування підводних місій для АНПА–РБ щодо патрулювання екологічно захищеної акваторії;
- завантаження в бортовий контролер АНПА–РБ підводної місії (місій) по радіоканалу та/або через рознімач інтелектуальної системи управління (ІСАУ) підводного апарату перед його випуском у море;
- ручне керування підводною місією АНПА–РБ оператором, який перебуває в ЦКПМ;
- прийом, обробка та документування інформації, що надходить від АНПА–РБ при виконанні підводної місії;
- виявлення в результаті обробки інформації ознак, що свідчать про наявність передумов до екологічних подій на судні, що обстежується (діагностується), і генерування рекомендаційних або директивних рішень відповідно до юридичного статусу запропонованого комплексу технічних засобів.

Береговий пост запуску АНПА–РБ призначений для виконання спуско-підйомних операцій зі спуску АНПА–РБ на воду перед початком підводної місії та підйому його з води після завершення підводної місії. Основними елементами такого поста є спеціалізований вантажний спуско-підйомний пристрій та транспортний візок для перевезення АНПА–РБ від місця берегового зберігання до спуско-підйомного пристрою.

Береговий пост технічного обслуговування АНПА–РБ призначений для технічного обслуговування АНПА–РБ (групи АНПА–РБ) у період між виконанням підводних місій.

Тут виконуються такі основні роботи:

- технічна підготовка АНПА-РБ до виконання заданої підводної місії;
- огляд та профілактика АНПА-РБ після виконання заданої підводної місії;
- регламентні роботи з АНПА-РБ відповідно до «Інструкції з експлуатації АНПА-РБ».

При цьому у складі берегового посту передбачено:

- набір запасних інструментів та приладів (ЗІП), необхідних для оперативного дрібного ремонту АНПА-РБ;
- набір діагностичного обладнання та приладів для діагностування несправностей АНПА-РБ та їх усунення в умовах експлуатації АНПА-РБ;
- набір матеріалів, інструментів та оснастки для виконання регламентних робіт з АНПА-РБ.

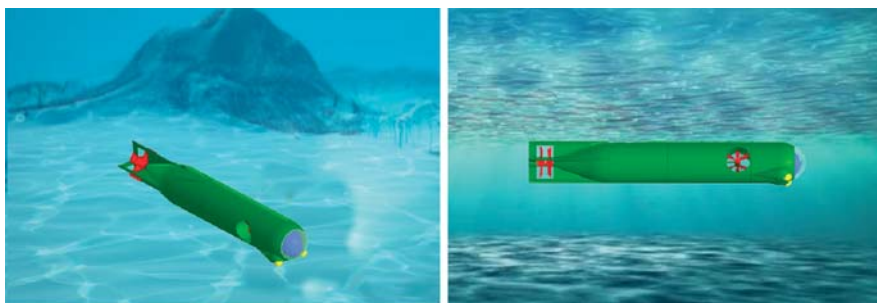
АНПА-РБ проекту «Каліпсо» являє собою програмно керований та/або вручну керований підводний носій корисного вантажу (в англomовній літературі – Hydroacoustic Measuring Complex, НМС), інформація від якого за допомогою радіобуя передається радіоканалом на ЦКПМ.

Програмне керування здійснюється при цьому за допомогою інтелектуальної системи керування (ІСАК) в автоматичному режимі, ручне управління – оператором, що знаходиться в ЦКПМ, за допомогою каналу інформаційного обміну через радіобуй.

Основні режими роботи АНПА-РБ як основного виконавчого пристрою, такі:

- режим R_p гідроакустичного прослуховування акваторії (рис. 1.8); при цьому радіобуй знаходиться в «гаражі», а сам АНПА може, залежно від поточного стану місії, перебувати на дні (рис. 1.8, а) або виконувати планомірні переміщення по акваторії, що захищається, під управлінням ІСАУ (рис. 1.8, б);
- режим R_{GS} вимірювання гідроакустичних шумових полів судна, що діагностується (рис. 1.9); при цьому АНПА може перебувати в русі або зависати в товщі води з вимкненим

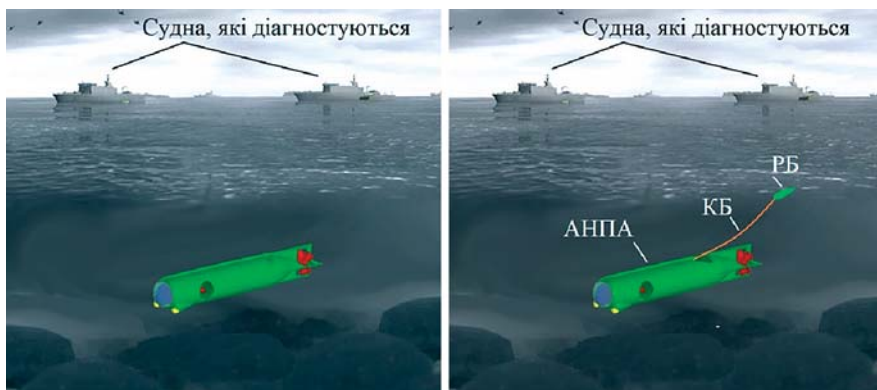
рушієм для виключення додаткових шумових перешкод;
у цьому режимі радіобуй може перебувати в «гаражі»
(рис. 1.9, а, діагностування судна без зв'язку з ЦКПМ)
або буксируватись по поверхні моря (рис. 1.9, б, режим
«on line» діагностування судна);



а

б

Рисунок 1.8 – Режим R_p гідроакустичного прослуховування акваторії:
а – АНПА лежить на ґрунті; б – АНПА виконує планомірні переміщення
акваторією, що захищається, під управлінням ІСАУ



а

б

Рисунок 1.9 – Режим R_{GS} вимірювання гідроакустичних шумових полів
суден, які діагностуються: а – діагностування суден без оперативного
зв'язку із ЦКПМ; б – діагностування суден в «on line» режимі з ЦКПМ

- режим R_c зв'язку з ЦКПМ (рис. 1.10); у цьому режимі АНПА-РБ проекту «Каліпсо» може бути виконувати наступні основні функції:
 - функція передачі в ЦКПМ гідроакустичної інформації за результатами діагностування суден;
 - функція отримання нової підводної місії від ЦКПМ;
 - функція ручного керування підводною місією.

Зауважимо також, що застосування АНПА-РБ дозволяє виконувати й низку інших завдань, серед яких, в першу чергу, знаходяться завдання відеообстеження підводних об'єктів.

Наприклад, для низки завдань підводного обстеження акваторій актуальними є пошук, обстеження та документування (цифрове картографування) затонулих об'єктів, завдання анти-терористичної охорони акваторій та ін.

При вирішенні такого роду завдань застосування АНПА-РБ забезпечує ручне дистанційне керування процесом обстеження, ідентифікації та документування таких об'єктів, а також, за необхідності, та керування процесами знешкодження таких об'єктів (рис. 1.11).

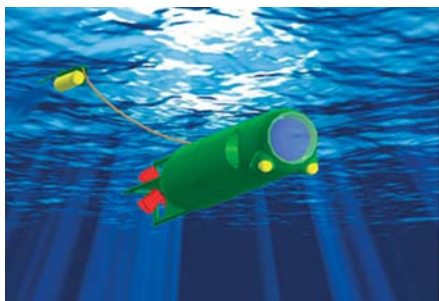


Рисунок 1.10 – Режим R_c
радіозв'язку АНПА с ЦКПМ

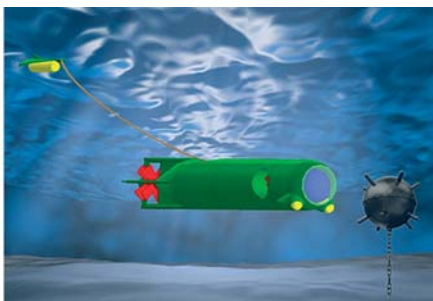


Рисунок 1.11 – Ручне керування
АНПА-РБ оператором з ЦКПМ

1.2.4. До АНПА-РБ розважального призначення належить підводний апарат «Gladius Advanced Pro» фірми «Chasing Innovation» (КНР) [19]. Завдяки простим у управлінні елементам керування, сенсорам освітлення та вбудованим алгоритмам якості

зображення цей вид ЗПР дає змогу непідготовленому оператору знайомитись з підводним світом, знімаючи високоякісні фото- та відеозображення з берегової смуги або з борту будь-якого судна, призначеного для відпочинку та туризму.

Підводний апарат має наступні основні характеристики:

- глибина занурення, м 100
- розміри, мм..... 406×254×76
- вага, кг..... 3,0
- кількість рушіїв 4
- швидкість горизонтального руху, м/с 2
- формат сигналу відеокамери MP4 (4K-1080P-720P)
- кут огляду відеокамери, град..... 150
- формат сигналу фотокамери RAW/JPG (12 Мп)
- підводні світильники:
 - тип LED
 - температура кольорова, °К..... 4200
 - потужність, люмен..... 2×1200
- навігаційні сенсори:
 - глибини (помилка, м ±1)
 - температури (помилка, °С ±2)
 - триохосові гіроскоп і акселерометр
- джерело електроживлення:
 - акумулятор LiPo
 - енергія заряду, Ватт·годин 57
 - тривалість роботи, годин 3,5
 - тривалість заряджання , годин 1,5
- радіобуй:
 - дальність вбудованого модулю WiFi-зв'язку, м 500
 - діаметр, мм 4
 - міцність на розрив, Н 500
- кабель-буксир для радіобуя:
 - довжина, м 100
 - діаметр, мм 4
 - міцність на розрив, Н 500
 - плавучість нейтральна
- операційна система IOS/Android

До комплекту поставки цього виду ЗПР входять підводний апарат, пульт керування, радіобуй та кабель-буксир, розміщені на в'ющі.

Зовнішній вигляд обладнання АНПА-РБ «Gladius Advanced Pro» показано на рис. 1.12.



Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд обладнання АНПА-РБ
«Gladius Advanced Pro»

На рис. 1.12 зображено: *а* – транспортний кейс з розміщеним обладнанням АНПА–РБ «Gladius Advanced Pro»; *б* – АНПА «Gladius Advanced Pro»; *в, г* – пульт керування АНПА–РБ, відповідно, у складеному стані та з підключеним серійним смартфоном у якості відеомонітору та накопичувача інформації; *д* – радіобуй у вигляді в'юшки з кабель-буксиром та WiFi-антенами; *е* – радіобуй у робочому положенні.

Підводний апарат оснащений вбудованою камерою 1080P (стандартна) або 4K (розширена) для створення зображень у стандарті UHD найвищої якості. Мінімальна роздільна здатність UHD TV – 3840×2160 пікселів (8,3 мегапікселя), що вчетверо більше за стандарт FullHD. Це дає змогу користувачам знімати фотографії та відео безпосередньо у внутрішню пам'ять або транслювати пряму трансляцію в режимі реального часу.

АНПА–РБ «Gladius» має світлодіодні ліхтарі з обох боків відеокамери для кута освітлення 135 градусів. Кожна лампа має потужність 1200 люмен і має регулятори затемнення для різних умов підводної зйомки. Ефективний механізм стабілізації в поєднанні з датчиками слабкого освітлення та алгоритмом оптимізації якості зображення дає змогу створювати високоякісні підводні кадри без спотворень, що сприяє широкому використанню такого виду ЗПР серед користувачів, які не є професійними фотографами та операторами.

Полімерні літій-іонні батареї витримують до трьох годин безперервної зйомки та потребують лише півтори години заряджання. Підводний апарат оснащений захистом від низького заряду батареї, який сповіщає користувачів, коли заряд батареї падає нижче 10 відсотків. Коли рівень заряду буде нижче 5 відсотків, система переходить в режим «блокування», тобто у «сплячий» режим щоб уникнути остаточного пошкодження батареї.

АНПА–РБ «Gladius Advanced Pro» сумісний зі спеціальними програмами мобільної операційної системи iOS від компанії «Apple» та платформою Android для мобільних телефонів та планшетних комп'ютерів компанії «Google». Це дає змогу корис-

тувачам вибирати та зберігати зображення на своєму смартфон здійснювати пряму трансляцію підводних відеосюжетів безпосередньо на платформах соціальних мереж.

Очевидно, що АНПА–РБ розважального призначення утворюють окремий вид ЗПР, який має широкі перспективи на ринку ЗПР як техніка вивчення підводного світу, доступна широким колам населення.

Таким чином, огляд АНПА наведених чотирьох напрямків застосування свідчить, що використання радіобуя з метою забезпечення оперативного зв'язку з ЦКПМ суттєво підвищує продуктивність засобів підводної робототехніки, об'єднуючи переваги автономних і прив'язних підводних апаратів. При цьому найбільш ефективним є застосування АНПА–РБ на мілководних акваторіях, оскільки зі збільшенням глибини необхідно збільшувати довжину КБ, а це викликає додаткові технічні труднощі у побудові цього виду ЗПР.

1.3 Основні завдання АНПА–РБ на мілководних акваторіях України у сучасних умовах

Одним з основних завдань держави на морі є охорона підводного простору у територіальних водах України. При цьому необхідно гарантувати безпечну експлуатацію водного транспорту в межах внутрішнього моря України, зокрема, безпечний захід, стоянку та вихід суден різного призначення з українських портів. Для виконання вказаних задач необхідно вирішити наступні завдання:

- забезпечення безпеки судноплавства на маршрутах, що підпорядковані законодавству України;
- забезпечення антитерористичної та протидиверсійної діяльності, яка можлива по відношенню до об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ);
- забезпечення протимінної оборони, яке включає в себе знешкодження як сучасних мінних засобів, так і засобів, що залишилися з часів Другої світової війни;

- пошук несанкціоновано встановленого зловмисниками обладнання, яке знаходиться на донній поверхні та в товщі води захищеної акваторії;
- виявлення зміни ландшафту підводної обстановки природнього або антропогенного походження (затонулі судна, господарські споруди, несанкціоновано розміщені на акваторії тощо).

Забезпечення безпеки мореплавства включає в себе очищення основних суднохідних шляхів від небезпечних об'єктів, до яких відносяться морські міни, затонулі об'єкти, великі техногенні об'єкти, що утворилися на місці аварій суден. Для виконання поставленої задачі необхідне висвітлення підводної обстановки основних суднохідних шляхів та оновлення навігаційних карт.

За останні роки збільшилася загроза терористичної діяльності, яка може бути направлена як з надводної, так і з підводної частини акваторій. Основними об'єктами терористичної та диверсійної діяльності можуть бути не тільки порти та прибережні економічні об'єкти, а й рухомі судна [20]. Сучасний розвиток водолазної техніки (транспортувальники водолазів, надмалі підводні човни тощо) дозволяє приховано доставити диверсанта або терориста до об'єкта МКІ, що охороняється. Гідроакустичні станції можуть виявити порушника лише в невеликій зоні на мілководних акваторіях [21]. Магнітометричні засоби виявлення є більш ефективними, але вони працюють на невеликих глибинах [22]. Для захисту рухомих суден та портових районів ефективніше застосовувати спеціалізовані прив'язні підводні системи (ППС) та автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) [23].

Мінна загроза може виникнути не тільки в результаті терористичних або диверсійних дій, а й може бути залишком Другої світової війни. Класичними засобами боротьби з мінами є застосування тральщиків, які за допомогою спеціалізованого тралу перерізають мінрепи якірних мін для їх подальшого знищення. Дана технологія менш ефективна для знешкодження мін зі спе-

ціалізованими пристроями детонації, які пошкоджують трал ще до його підходу до міни. Застосування АНПА в протимінній обороні дозволяє лише виявити міни та їх місцезнаходження. Ефективнішим в даному напрямку є застосування ППС, оскільки відеозображення передається оператору в режимі реального часу. Таким чином, з'являється можливість їх ефективного застосування для знешкодження міни шляхом дистанційно керованого перерізування мінрепу або доставки до неї підривного заряду [24].

Одним з видів протиправної діяльності на морі є контрабанда та торгівля людьми. Для її реалізації можливим є несанкціоноване встановлення різноманітних навігаційних приладів та спеціального обладнання на доній поверхні або на підводних частинах гідротехнічних споруд. Основною складністю виявлення такого обладнання є їхнє маскування, тому їх виявлення можливе, здебільшого, лише візуальним способом або магнітометричними засобами, які мають невеликий радіус дії. Тому основним засобом виявлення таких приладів та обладнання, що знаходиться на захищеній акваторії, є ППС як носії магнітометричної та відеоапаратури.

В водогосподарській діяльності особливо важливою є достовірна інформація про рельєф донної поверхні маршрутних сполучень, портових та господарських акваторій. Побудова карт донної поверхні сьогодні виконується за допомогою суден Держгідрографії України, оснащених гідролокаторами бічного огляду, а також за допомогою буксированих підводних апаратів (БПА) та АНПА. Основними критеріями для даного типу роботи є рівномірність руху носіїв гідроакустичного обладнання та велика робоча зона.

Виконання всіх поставлених задач вимагає постійного або періодичного висвітлення підводної обстановки. Висвітлення підводної обстановки дозволяє вирішити дві основні задачі:

- оперативно-тактичну – оперативне висвітлення підводної обстановки в заданій акваторії та інформування персоналу про виникнення відхилень від норми;

- стратегічну – для створення єдиного інформаційного простору про підводну обстановку територіальних вод України, які підлягають захисту.

Здебільшого, акваторії України, які потребують захисту, є мілководними. Мілководні акваторії – це прибережні морські та річкові водні шляхи, акваторії портів та їхні зовнішні рейди і якірні стоянки, акваторії озер і водосховищ. Вони мають глибини до 50–60 метрів та активно використовуються для транспортних і пасажирських перевезень, для видобутку енергоносіїв та будівельних матеріалів [25; 26].

Інтенсифікація промислової та наукової діяльності на мілководних акваторіях та зростання вимог до безпеки їх використання стимулюють розробку нових технологій оперативного висвітлення підводної обстановки та їх автоматизацію. Особливу актуальність такі технології мають для виконання завдань охорони об'єктів критичної морської інфраструктури на мілководному шельфі – портів, морських стаціонарних газовидобувних платформ, пам'яток підводної археологічної спадщини тощо [27; 28].

Традиційно проекти висвітлення надводної обстановки на мілководних акваторіях реалізують з використанням систем оптичного та радіолокаційного спостереження.

Висвітлення підводної обстановки є технічно та організаційно складнішим, оскільки вимагає залучення спеціальних приладів та засобів підводної робототехніки.

На даний час найпоширенішими є стаціонарні гідроакустичні прилади та магнітометричні системи, які встановлюються на морському дні акваторії, яка охороняється, та рухомі засоби висвітлення підводної обстановки, до яких відносяться автономні ненаселені підводні апарати та прив'язні підводні апарати [29; 30].

Проте, проекти висвітлення підводної обстановки в акваторіях з використанням технічних засобів гідроакустики та підводної робототехніки на мілководних акваторіях мають такі недоліки:

- для стаціонарних систем гідроакустики та магнітометрії – неможливість ідентифікації виявлених підводних об'єктів та неможливість оперативного внесення змін до просторової конфігурації обладнання. Крім того, на мілководних акваторіях радіус дії гідроакустичних засобів обмежений з-за відбиття звукових хвиль від донної та водної поверхонь;
- для АНПА – неможливість виконувати інформаційний обмін з ЦКПМ у реальному часі, що знижує ефективність системи у випадках, коли треба оперативно реагувати на зміну підводної обстановки (наприклад, при виявленні несанкціонованого підводного проникнення на захищену акваторію);
- для ППС – порівняно висока вартість застосування, оскільки для ефективного їх використання необхідно залучати відповідні судна-носії та обмежувати судноплавство на акваторії, яка обстежується.

Тому перспективними є розробка та автоматизація нових засобів підводної робототехніки, які б не мали вказаних недоліків та застосування яких підвищувало б загальну ефективність проєктів висвітлення підводної обстановки на мілководних акваторіях.

Зокрема, актуальним є підвищення оперативності та достовірності отримання інформації в акваторіях, які мають статус природоохоронних, якірних стоянок морських та річкових портів, акваторій військово-морських баз тощо.

У зв'язку з цим актуальним є прикладне наукове завдання створення малорозмірних засобів морської робототехніки, які б виконували трисдину підводну місію в автоматичному режимі:

- надійне виявлення бортовими пошуковими приладами порушника або несанкціоновано розміщеного на акваторії об'єкта;
- оперативний зв'язок з центром охорони акваторії для передачі у реальному часі поточної інформації про параметри акваторії та про виявлені факти несанкціонованого доступу на акваторію;

- сигнальний та/або силовий вплив на порушника або реалізація заходів щодо маркування місця знаходження несанкціоновано встановленого об'єкта, під керуванням з центру охорони акваторії.

В даній роботі для виконання підводних місій на мілководних акваторіях в інтересах українських організацій пропонується застосовувати АНПА-РБ (рис. 1.13) з динамічно змінюваною у процесі експлуатації довжиною кабель-буксира.

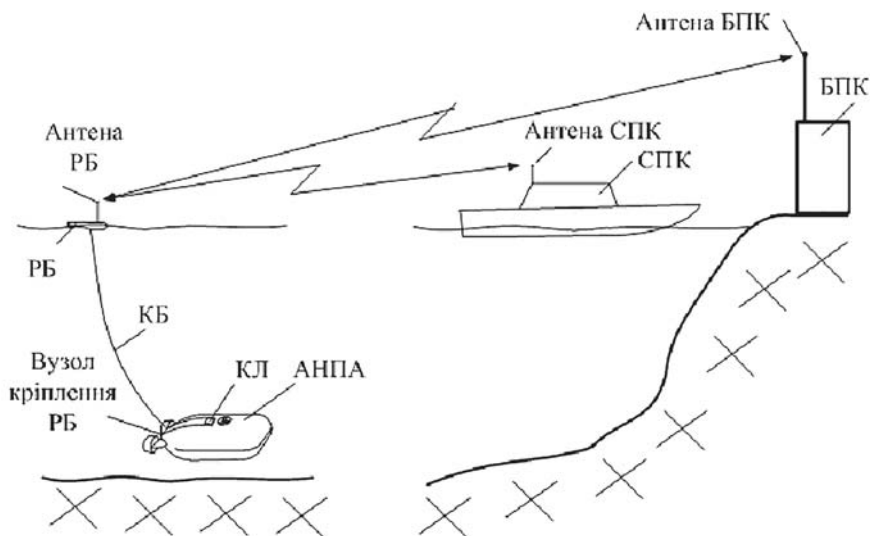


Рисунок 1.13 – Технологія застосування АНПА-РБ

Пропонований архітектурно-конструктивний тип підводного апарата містить як зовнішнє націпне обладнання буксирований радіобуй (РБ), який розташований у верхній кормовій частині АНПА, має змогу автоматично відстиківуватися від нього та рухатися поверхнею моря в буксированому режимі для забезпечення двостороннього зв'язку з береговим (БПК) або судновим (СПК) постом керування, а також автоматично пристиковуватися до АНПА після завершення місії.

Керовану зміну довжини КБ у вказаних режимах забезпечує кабельна лебідка (КЛ), яка розташована на АНПА.

Перевагами такого типу підводного апарата у порівнянні з застосуванням «класичних» ППС та АНПА є значно менша залежність від гнучкого зв'язку (кабелю-буксира радіобуя) з-за малої глибини, повна незалежність від судна-носія і, головне, наявність оперативного двохстороннього радіозв'язку з береговим чи судновим ЦКПМ.

Особливістю використання такого апарата є [31]:

- можливість оперативної передачі підводної інформації на пост керування;
- виключення рутинної роботи людини в процесі висвітлення підводної обстановки шляхом автоматизації процесу керування підводним рухом, в зв'язку з невеликою довжиною кабель-буксира, що значно зменшує ймовірність його заплутування;
- можливість повторного детального обстеження виявлених об'єктів в ручному та автоматизованому режимах.

Для висвітлення підводної обстановки АНПА–РБ працює в одному з двох режимів: патрулювання та оперативного обстеження.

Режим патрулювання забезпечує рух АНПА–РБ по заданій траєкторії з невеликою постійною швидкістю. Для реалізації даного режиму має забезпечуватись велика тривалість автономної роботи, за рахунок зменшення енергоспоживання рушіїв АНПА, оскільки гідродинамічний опір, який діє на систему АНПА–РБ, квадратично залежить від швидкості руху.

Режим патрулювання забезпечує пошук підводних потенційно небезпечних об'єктів або виявлення порушників, що знаходяться на захищеній акваторії. Даний режим працює до моменту виявлення підводним апаратом або іншими засобами висвітлення підводної обстановки несанкціонованих об'єктів, після чого АНПА–РБ переходить до режиму оперативного обстеження.

В режимі оперативного обстеження АНПА-РБ рухається зі швидкостями відповідно до його технічних характеристик. Даний режим роботи застосовується в задачах ідентифікації підводних об'єктів, картографування донної поверхні, супроводження суден тощо.

1.4 Аналіз ефективності використання автономних підводних апаратів з радіобуями

Водні транспортні шляхи держави, її морські та річкові порти відносяться до об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ). Їх технічний стан має гарантувати безпечний захід, стоянку та вихід суден різного призначення, а також безпеку для пасажирів та вантажів. Крім того, у територіальних водах України знаходяться об'єкти підводної культурної спадщини, які потребують відповідного обстеження й охорони [32].

Витрати часу роботи АНПА-РБ на моніторинг, у цілому, залежить від місії, яку виконує підводний апарат, та від способу його руху. До найбільш розповсюджених видів обладнання АНПА-РБ відносяться відео- та гідроакустичні прилади (підводні відеокамери зі світильниками та сонари). У деяких випадках застосовують магнітометри, профілографи, маніпулятори.

Найбільш широко застосованим способом руху апарата при виконанні моніторингу підводної обстановки є повздовжні галси. Час роботи в даному режимі пропонується визначити за довжиною пройденого шляху (L) АНПА-РБ.

Для моніторингу площі порту складної форми представимо, що вона обмежена двома криволінійними функціями $F_1(x)$ та $F_2(x)$ (рис. 1.14, а).

Відстань між галсами dx визначається шириною захвату відеокамери чи сонару секторного огляду (з необхідним перекриттям смуги обстеження та документування), а кількість галсів n визначається за формулою:

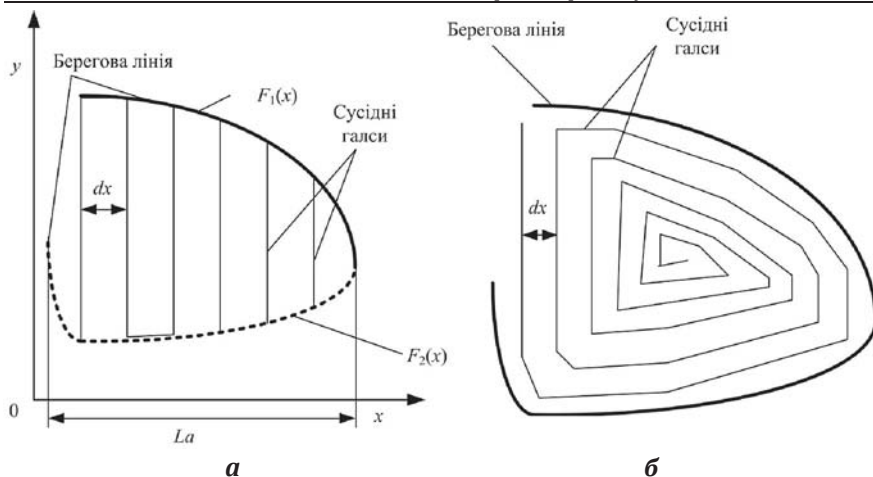


Рисунок 1.14 – Методи руху для обстеження площі:
а – повздовжні галси; б – кусочно-лінійна спіраль

$$n = \frac{La}{dx} - 1. \quad (1.1)$$

Таким чином, розділивши всю площу акваторії на окремі частини, загальну довжину шляху, який апарат має пройти, можна визначити за формулою:

$$L = \sum_{i=0}^n (F_1(x)_i - F_2(x)_i) + \sum_{i=0}^{n-1} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{dx^2 + (F_2(x)_i - F_2(x)_{i+1})^2} \text{ при } i \in 0, 2, 4, 6, \dots; \\ \sqrt{dx^2 + (F_1(x)_i - F_1(x)_{i+1})^2} \text{ при } i \in 1, 3, 5, 7, \dots \end{array} \right. \quad (1.2)$$

де i – номер поточного галса; $F_1(x)_i$ та $F_2(x)_i$ – крайні точки повздовжнього галсу (вздовж осі x) по осі y на заданому галсі i .

Для відкритих акваторій формула матиме вигляд:

$$L = \sum_{i=0}^n F_1(x)_i + \sum_{i=0}^{n-1} \begin{cases} dx & \text{при } i \in 0, 2, 4, 6, \dots; \\ \sqrt{dx^2 + (F_1(x)_i - F_1(x)_{i+1})^2} & \text{при } i \in 1, 3, 5, 7, \dots \end{cases} \quad (1.3)$$

Для причальних конструкцій прямокутної форми вираз прийемо $F_1(x) = \text{const} = H$ – глибина біля причалу; $F_2(x)=0$.

Таким чином отримаємо залежність:

$$L = n(H + dx) - dx. \quad (1.4)$$

Перевагами такого методу висвітлення підводної обстановки є простота керування АНПА-РБ.

Наступним методом руху апарата при моніторингу підводної обстановки є метод концентричної спіралі (рис. 1.14, б), коли апарат рухається по контуру заданої акваторії зі зменшенням радіусу. Відстань між сусідніми спіральними галсами відповідає ширині захвату вимірювального пристрою (з заданим перекриттям).

Оскільки в даному випадку не проводиться сканування однієї і тієї ж частини площі, то відстань можна виміряти, спираючись лише на загальну площу акваторії S .

Таким чином, загальна довжина пройденого апаратом маршруту складатиме:

$$L = \frac{S}{dx}. \quad (1.5)$$

Для визначення загального часу обстеження маршрут АНПА необхідно розбити на m частин, на яких апарат рухається з рівною швидкістю. Таким чином, залежність для визначення загальних витрат часу T буде мати вигляд:

$$T = \sum_{j=0}^m \frac{l_j}{v_j}, \quad (1.6)$$

де l_j – довжина частини шляху для руху з постійною швидкістю;
 v_j – швидкість на заданій частині шляху.

Проведемо аналіз ефективності для морських торговельних портів України [33] при використанні АНПА–РБ з наступними характеристиками:

- максимальна робоча глибина 50 м
- габаритні розміри АНПА 850×420×350 мм
- довжина кабель-буксира до 75 м
- маса апарата 50 кг
- габаритні розміри РБ 350 × Ø 80 мм
- автономність 3 години
- швидкість АНПА–РБ 1 м/с
- прозорість води (d) 1 м
- кут захвату відеокамери (α) 60°
- час автономної роботи 3 год.
- огляд причальних стінок буде проводитися
методом повздовжніх вертикальних галсів,
а моніторинг акваторії –
методом концентричної сітки;
- зона перекриття камери (Δ) 0,3 м.

Спираючись на вказані характеристики, ширина захвату відеозображення становитиме:

$$dx = 2 \frac{d}{\operatorname{tg}(\alpha)} - \Delta = 2 \frac{1}{\operatorname{tg}(60)} - 0,3 = 0,85 \text{ м.} \quad (1.7)$$

Результати попереднього аналізу ефективності АНПА–РБ, які обладнано відеокамерами для обстеження технічного стану причальних стінок, зведено до табл. 1.1.

Огляд акваторій морських портів пропонується проводити методом концентричної спіралі.

Таблиця 1.1 – Ефективність АНПА-РБ для огляду причальних стінок портів

№ з/п	Порт	Загальна довжина причалу, м	Середня глибина причалу, м	Загальний час огляду, год.	К-сть заходів АНПА
1	Білгород-Дністровський морський торговельний порт	1 275	5,5	2,7	1
2	Бердянський морський порт	1 511	7,9	4,4	2
3	Дніпро-Бузький морський порт	810	9,4	2,8	1
4	Морський торговельний порт «Чорноморськ»	962	13,5	4,6	2
5	Маріупольський морський порт	3 693	9,3	12,3	5
6	Миколаївський морський порт	2 940	10,3	10,8	4
7	Одеський морський порт	6 664	9,65	22,9	8
8	Очаківський морський порт	726	4,1	1,2	1
9	Скадовський морський порт	792	5,5	1,7	1
10	Херсонський морський порт	1 262	6,2	3	1
11	Морський торговельний порт «Південний»	2 196	14	10,7	4
12	Морський спеціалізований порт Ніка-Тера	1 600	11	5,5	2

Таким чином, розрахунок буде вестися відносно площі акваторії. Моніторинг акваторії буде проводитись за допомогою засобів гідроакустики з захватом донної площі шириною захвату 50 м та зоною перекриття 10 м.

Результати розрахунку зведено до табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Ефективності патрулювання АНПА-РБ гідроакустичними засобами

№ з/п	Порт	Загальна площа акваторії, м ²	Загальний час огляду, год	Шлях пройдений апаратом, м	Кількість заходів АНПА
1	Білгород-Дністровський морський порт	590 400	4,1	14 760	2
2	Бердянський морський порт	414 550	2,9	10 363,8	1
3	Дніпро-Бузький морський порт	980 000	6,9	24 500	3
4	Миколаївський морський порт	693 000	4,9	17 325	2
5	Одеський морський порт	1 410 000	9,8	35 250	4
6	Очаківський морський порт	122 000	0,9	3 050	1
7	Морський спеціалізований порт Ніка-Тера	67 400	0,47	1 685	1

Підвищення ефективності обстеження даних акваторій може бути забезпечено використанням одночасно декількох підводних апаратів. Дана технологія може використовуватися двома способами:

- розділення зони відповідальності між декількома апаратами, що зменшить площу обстеження для кожного апарата;
- використання декількох апаратів в режимі ведучий-ведений, з перекриттям зони видимості, що збільшить зону захвату dx .

1.5 Автономний підводний апарат з радіобуєм як об'єкт керування

Мілководдя накладає певні обмеження на технічні вимоги, які ставляться до апаратів типу АНПА-РБ. Перш за все, це обмеження масогабаритних характеристик самого підводного апарата, оскільки невеликі глибини не дають змоги використання підводних апаратів середнього та важкого класу, а також ускладнюють використання судна-носія для таких апаратів.

В свою чергу, обмеження в масогабаритних характеристиках впливає безпосередньо на кількість акумуляторних батарей, які можна встановити на АНПА. Таким чином, виникає необхідність оптимізації рушійно-кермового комплексу (РКК), оскільки він є найпотужнішим споживачем енергії. Також важливу роль відіграє конструкція самого РБ, тому що його дія на АНПА через КБ є збуренням, вплив якого треба зменшувати.



Рисунок 1.15 – Конструкція радіобуя

У зв'язку з цим пропонується конструкція РБ (рис. 1.15), яка забезпечить його пасивну стабілізацію в приповерхневому шарі води, що приведе до зменшення його розмірів через відмову від активних засобів стабілізації та зменшення впливу вітро-хвильових збурень.

Корпус РБ має продовговату форму, що зменшує його лобовий опір при збереженні внутрішнього об'єму. Для уникнення появи диферентуючого моменту від КБ його кріплення розташовується на вертикальній осі, яка проходить через центр мас підводного апарата.

Для стабілізації крену та диференту від зовнішніх збурень встановлюються хвостові стабілізатори, а також передбачається розміщення важких елементів в нижній частині РБ. Таким

чином, буде забезпечуватися пасивний відновлювальний момент. Для утримання РБ в приповерхневому шарі він повинен мати невелику додатну плавучість, а для компенсації дії КБ при русі встановлюються неповоротні крила, вісь яких проходить через центр мас радіобуя.

Для підводних апаратів інспекційного типу оптимальною є структура РКК, який включає в себе один вертикальний рушій, упор якого проходить через центр мас АНПА, та два маршових рушія, які розташовані в горизонтальній площині АНПА та забезпечують маршовий рух з маневруванням в горизонтальній площині (рис 1.16).

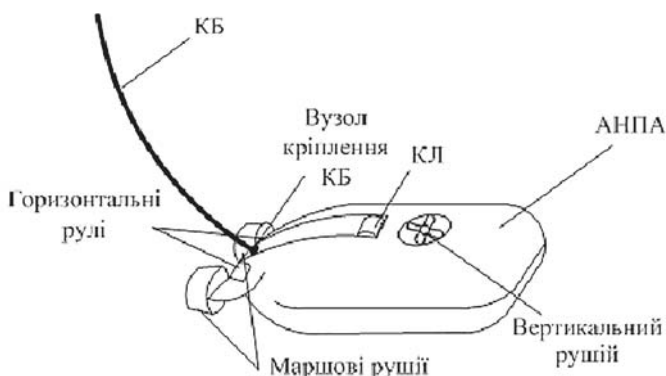


Рисунок 1.16 – Конструкція АНПА

Дана конструкція РКК має три керовані ступені свободи (прямолінійний вертикальний, повздовжній та поворотний), що можуть повністю забезпечити необхідне переміщення АНПА-РБ, та найменшу кількість гребних електродвигунів [34].

Основною проблемою використання даної конструкції РКК є неможливість з'єднання КБ з центром мас АНПА. Тому його кріплення необхідно здійснити в кормовій частині апарата так, щоб в точці кріплення не виникав момент, який створює крен.

Таким чином, задача стабілізації положення буде вирішуватися лише як задача компенсації дії диферентуючого моменту.

Для компенсації дії КБ під час руху АНПА в його кормовій частині встановлюються горизонтальні рулі (ГР), поворот яких забезпечує необхідний момент компенсації диферентуючого моменту КБ.

1.6 Аналіз систем автоматичного керування підводними апаратами

Однією з важливих проблем, яка впливає як на точність керування, так і на якість виконуваних задач АНПА–РБ, є стабілізація АНПА в горизонтальній площині. На основі аналізу систем стабілізації просторового положення виділимо такі основні її способи:

- першим способом стабілізації кутового положення є конструктивні рішення, які передбачають розміщення важких елементів в нижній частині АНПА. Це дає змогу розмежувати центри мас та плавучості апарата, що забезпечить відновлення горизонтального положення апарата внаслідок різниці дій сил ваги та плавучості при появі крену або диференту [35; 36]. Даний спосіб є ефективним при невеликих моментах дії на корпус АНПА–РБ і відновлювальна сила не може бути керованою – вона збільшується лише при збільшенні відхилення від горизонтального положення;
- другим способом є стабілізація диферента за рахунок встановлення системи динамічної зміни плавучості [37]. Використання даного підходу, перш за все, призведе до значного збільшення габаритних показників апарата;
- третім способом динамічної зміни диферента є використання підрулюючих пристроїв, які розташовують в носовій та кормовій частинах апарата [38; 39]; дана конструкція РКК збільшить не тільки габарити АНПА, але й підвищить енергоспоживання;
- в буксированих підводних апаратах для керування диферентом застосовують горизонтальні рулі [40; 41]. Дана методологія є перспективною для використання на

АНПА-РБ, оскільки вона передбачає енерговитрати лише в перехідних режимах руху. Недоліком застосування подібних систем на самохідних підводних апаратах є те, що вони не передбачують вертикального руху, при якому горизонтальні крила створюють диферентуючий момент.

Однією з важливих задач, що ставляться перед системою автоматичного керування АНПА, є стабілізація курсу. Регулятори стабілізації курсу входять до складу низки систем автоматичного керування: стабілізації підводного апарата на заданій відстані від об'єкту [42; 43], траєкторного руху [44], системи підтримання дистанції [45] тощо.

Реалізація САК одновимірним рухом є досить поширеною тематикою, та має реалізацію за допомогою адаптивних ПІД регуляторів [46; 47], регуляторів з нечіткою логікою [48]. Але в зазначених роботах не проаналізовано функціонування даних регуляторів при комбінованому русі АНПА.

Система автоматичного керування, що описана в [42], базується на застосуванні ПІД-регуляторів. Використання класичних ПІД-регуляторів є недостатньо ефективним, оскільки рух підводного апарата характеризується низкою нелінійностей, таких як гідродинамічний опір, упор гребного гвинта тощо. Сигнал керування від кожного регулятора займає невід'ємну частину від його максимального значення.

В [49] представлено нейронно-нечіткий регулятор курсу, який налаштовується за допомогою нейронної мережі. Представлений регулятор має середню похибку яка складає 1,08 градуса. Підвищення точності регулятора можливе за рахунок збільшення кількості вибірок сигналу.

Реалізація регулятора курсу в [50] показує переваги використання нечіткої логіки перед класичними ПІД-регуляторами. Розроблений регулятор використовується для керування рухом автономного підводного апарата в умовах невизначеності, але лише для одного ступеня свободи.

У роботі [51] показано, що застосування нейро-нечіткого підходу для синтезу регуляторів курсу судна забезпечує високу якість керування. Однак регулятори мають складну структуру, а якість їх роботи сильно залежить від точності математичних моделей, що використовуються при їх навчанні.

Методика, що представлена в [52], вирішує задачу стабілізації параметрів підводного апарата методом мінімізації локальних функціоналів. Дана методика забезпечує високу динамічну стійкість, але має значну тривалість перехідного процесу.

Регулятори тривимірного руху з можливістю стабілізації в точці [53; 54], зазвичай використовуються для підводних апаратів зі структурою РКК, які містять чотири рушії для забезпечення рух апарата в горизонтальній площині.

Авторами [55] розроблено математичну модель підводного роботу «Есо Марпер», заснованого на розрахунках з використанням CFD-пакетів. Розглянуто питання контролю важливих гідродинамічних параметрів АНПА, однак питання визначення керуючих впливів на РКК при його маневруванні не розглядається.

Таким чином, синтез систем керування стабілізованим рухом АНПА з урахуванням впливу його РБ є актуальним прикладним науковим завданням.

1.7 Концепція побудови системи керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм

Система керування АНПА-РБ має забезпечувати не тільки роботу в автоматичному режимі, а й можливість керування рухом АНПА безпосередньо оператором в режимі реального часу. Узагальнений алгоритм виконання підводної місії наведено на рис. 1.17.

Перед початком місії через інтерфейс користувача завантажуються програма місії із завданнями, які повинен виконувати підводний апарат.

До таких завдань відносяться [56]:

- обстеження плоскої поверхні або донної поверхні;
- інспекція протяжних об'єктів;
- робота з точковими об'єктами;
- обстеження товщі води;
- патрулювання в заданій акваторії.

Завантаження місії включає в себе постановку задач для вимірювального обладнання та опис меж зони обстеження захищеної акваторії. По отриманим даним про акваторію будується масив контрольних точок, що будуть складати попередню траєкторію руху АНПА–РБ.

Дана траєкторія накладається на підводну карту акваторії, а за допомогою методів огинання перешкод сформований маршрут уточнюється і корегується. На виході траєкторії отримуємо масив точок, які необхідно пройти та режими роботи начіпного обладнання між ними.

Далі АНПА–РБ переходить в перший режим роботи заданої місії. Зазвичай, перший режим передбачає вихід на точку початку траєкторії виконання місії.

Для керування рухом АНПА–РБ передбачено два режими: режим ручного керування та режим автоматичного руху АНПА. Під час ручного керування рухом АНПА через інтерфейс користувача оператор за допомогою пристроїв керування, здебільшого джойстиків, керує РКК, а отже й рухом самого АНПА. При цьому стабілізація диферента, а також підтримання оптимальної довжини КБ здійснюються в автоматичному режимі.

При автоматичному керуванні рухом АНПА–РБ спочатку відбувається перетворення координати, яку необхідно досягнути в вектор руху АНПА, а потім регулятори системи автоматичного керування (САК) перетворюють його на сигнали керування елементами РКК.

Після отримання сигналів керування відповідно до типу електроприводу, що використовується в РКК АНПА, обчислюються реальні фізичні величини: напруга для двигунів постійного струму, напруга і частота для асинхронних двигунів тощо.

Керування оптимальною довжиною кабель-буксиру завжди виконується в автоматичному режимі, чим спрощується робота оператора при ручному керуванні АНПА.

Оптимальна, по критерію мінімізації сили натягу, довжина кабель-буксира для АНПА-РБ залежить лише від глибини його занурення, оскільки при буксируванні РБ є лише одна оптимальна форма КБ [57].

Керування горизонтальними рулями АНПА, які забезпечують стабілізацію диферента, також здійснюється в автоматичному режимі, оскільки автоматична система забезпечує точнішу стабілізацію та має вищу швидкодію ніж оператор.

Керування навісними обладнанням, в залежності від його типу, може здійснюватись як в ручному (для маніпулятора) так і в автоматичному (гідролокатор бічного огляду, сонар тощо) режимі. Керування вимірювальним обладнанням в автоматичному режимі передбачає лише його ввімкнення і вимкнення для економії енергії при роботі АНПА-РБ.

Обробка навігаційних даних включає в себе опитування навігаційних датчиків (магнітометра, акселерометра, гіроскопа, доплерівського лага, *GPS* тощо), та перетворення їх показань в необхідні для САК дані (кутове та просторове положення, швидкість руху АНПА).

Оновлення статусу місії після кожної ітерації керування АНПА дає змогу оцінити роботу, яку виконав підводний апарат, та є сигналізатором для переключення режимів його роботи. Оновлення статусу місії при ручному керуванні АНПА дає змогу оцінити роботу оператора і при перемиканні в автоматичний режим САК не буде повторно її проводити.

Виходячи з необхідності автоматичного виконання основних підводних місій АНПА-РБ – пошуку, обстеження та інспекції підводних об'єктів, а також патрулювання захищеної акваторії – пропонується наступний перелік їх основних робочих режимів *R*, які підлягають автоматизації:

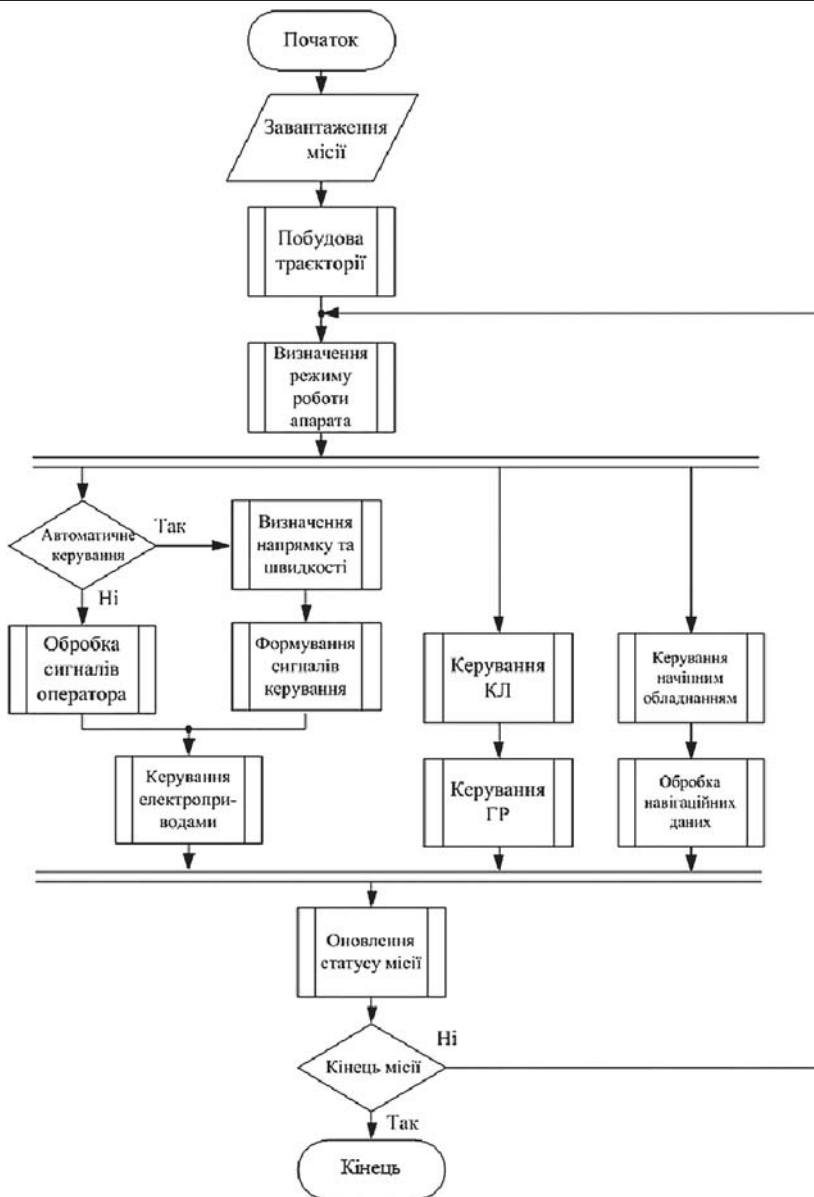


Рисунок 1.17 – Узагальнений алгоритм виконання підводної місії

- режими лінійного $R_{ПЛ}$ чи траєкторного $R_{ПТ}$ руху АНПА–РБ по поверхні заданої акваторії з метою виходу у точку занурення (радіобуй не випущено);
- режим R_3 занурення АНПА на задану глибину з одночасним випусканням кабель-буксиру РБ;
- режими лінійного $R_{ГЛ}$ чи траєкторного $R_{ГТ}$ руху АНПА на заданій глибині та заданим курсом з буксируванням РБ;
- режими лінійного $R_{ВЛ}$ чи траєкторного $R_{ВТ}$ руху АНПА на заданій висоті над ґрунтом та заданим курсом з буксируванням РБ;
- режими слідування $R_{СЛ}$ за рухомою ціллю;
- режим R_C спливання АНПА з одночасним вибиранням кабель-буксиру РБ та його поверненням на АНПА.

Першим режимом роботи є вихід на точку початку місії, а останнім – аналогічний з позицій функціонування САК – повернення АНПА–РБ до місця базування після закінчення місії.

У свою чергу, даний рух може представляти собою як пряму лінію $R_{ПЛ}$, на відкритих акваторіях, так і певну траєкторію $R_{ПТ}$, при наявності перешкод (судна, гідротехнічні споруди тощо).

Основною задачею даного режиму є точність виходу на точку початку місії. В наш час найбільш ефективним засобом визначення координат є *GPS*-прив'язка. Однак *GPS* не працює в товщі води, тому АНПА–РБ повинен рухатися біля поверхні. Такий підхід дасть змогу визначати координати АНПА–РБ та вектор швидкості його руху, користуючись лише одним датчиком. Але для ефективного керування за допомогою САК виникає необхідність використання датчиків кутового положення АНПА для отримання коректних сигналів керування РКК.

Під час виходу на точку для економії енергії все націпне обладнання необхідно вимикати. Тому на роботу САК його функціонування впливати не буде. Отже, задачею САК в даному режимі роботи є керування рухом АНПА зі стабілізацією заданих маршової швидкості v_m та курсу φ_z , для правильного траєкторного або лінійного руху та виходу на точку з мінімальними

енергозатратами. Виходячи з того, що апарат знаходиться на поверхні, контроль витравленої частини кабель-буксира в даному режимі не проводиться.

Після виходу на точку початку місії апарат повинен зануритися на задану глибину R_3 з підтриманням курсу та координат точки позиціонування. В даному випадку якість позиціонування визначається положенням радіобуя на поверхні. При цьому сила натягу КБ повинна бути мінімально можливою для полегшення стабілізації диференту, тому для зменшення опору корпусу апарата горизонтальні рулі встановлюються у вертикальне положення.

Виходячи з цього САК в даному режимі роботи повинна забезпечувати наступні параметри: необхідна стабілізація вертикальної швидкості v_y , курсута підтримка оптимальної довжини кабель-буксиру $L_{\text{опт}}$ з можливістю прогнозування даного параметра за поточною глибиною H .

Одним з основних режимів роботи для АНПА запропонованого типу є лінійний або траєкторний рух на заданій глибині для пошуку об'єкта або сканування морського дна. В даному режимі рух підводного апарата підпорядкований вимірювальному обладнанню, тому САК повинна забезпечити стабілізацію курсу φ_z , маршової швидкості v_m та глибини H .

Крім того, САК рухом апарата повинна забезпечити відсутність ривків, які надходять до апарата через КБ. Тому САК повинна підтримувати оптимальну довжину випущеної частини КБ, що дасть змогу мінімізувати зміну сили натягу.

Найскладнішими для АНПА-РБ є режими лінійного та траєкторного руху на заданій висоті над ґрунтом H_r . Основною відмінністю від попереднього режиму є рух апарата не в одній площині, а в просторі. Тому САК повинна оперувати додатковими параметрами: вертикальною швидкістю та висотою над ґрунтом. В такому режимі горизонтальні рулі виконують стабілізацію диферента відхиленням горизонтальних рулів, отриманим на основі вектору руху АНПА.

Під час роботи групи апаратів або при виконанні задачі охорони об'єкта виникає необхідність в спеціалізованих режимах руху апарата, наприклад переслідування цілі або слідкування за нею. Основними відмінностями спеціалізованих САК є постійна зміна координат цілі ($X_{ц}$, $Y_{ц}$, $Z_{ц}$) та вимога до забезпечення максимально допустимої швидкості маршового руху АНПА-РБ в процесі його виходу на задану дистанцію, після якого швидкість руху підводного апарата повинна дорівнювати швидкості руху цілі. Дані вимоги з'являються через необхідність підтримувати оптимальну довжину КБ в різних режимах руху.

Одним з найпростіших режимів роботи є режим спливання R_C , який в ході виконання підводної місії є останнім або передостаннім (перед поверненням до місця базування). Він є аналогічним режиму занурення, але немає жорстких вимог до стабілізації в точці та утримання курсу.

Для уніфікації автоматичного керування в зазначених режимах роботи розіб'ємо всю САК на окремі модулі в залежності від призначення [58]. Хоча представлений апарат є автономним, він може керуватися в режимі реального часу оператором, який знаходиться на березі або на борту судна-носія. Тому узагальнено САК може бути представлена у вигляді трирівневої ієрархічної структури (рис. 1.18) [59] (інструментальний рівень не є складовою САК).

Стратегічний рівень складається з інтерфейсу користувача (ІК) та контрольно-аварійної системи (КАС). Даний рівень відповідає за взаємодію з оператором та реалізує керування підводним апаратом в аварійних режимах.

Основним елементом стратегічного рівня є ІК, оскільки він забезпечує взаємодію між оператором та АНПА-РБ. Даний інтерфейс забезпечує постановку підводної місії та роботу АНПА-РБ в режимі ручного керування.

Оператор надає системі постановки місії (СПМ) координати крайніх точок акваторії, які необхідно обстежити $\bar{P}_A$, кількість

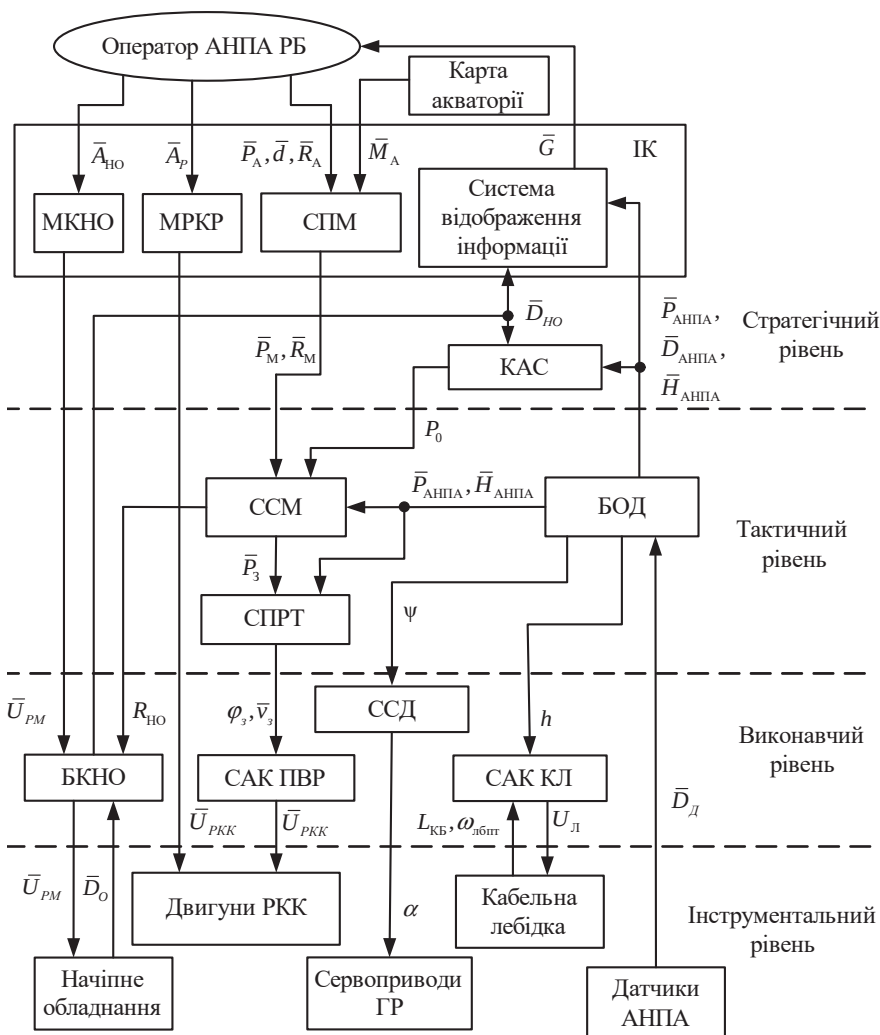


Рисунок 1.18 – Узагальнена структура системи автоматичного керування

галсів або відстань між горизонтальними та вертикальними галсами $\bar{d}$, а також вказує режими роботи націпного обладнання підчас проведення місії $\bar{R}_A$.

Опираючись на цифрову карту акваторії $\bar{M}_A$, яку необхідно обстежити, СПМ створює масив контрольних точок $\bar{P}_M$, які повинен пройти АНПА-РБ в процесі виконання місії та режими роботи націпного обладнання між даними точками $\bar{R}_M$.

За допомогою модулю ручного керування рухом (МРКР) дії оператора $\bar{A}_p$, які виконуються за допомогою пристроїв введення (наприклад, джойстиків) перетворюються в сигнал керування для РКК АНПА-РБ.

Якщо націпне обладнання (наприклад, маніпулятор) має робочі механізми, якими повинен керувати оператор, то дії оператора $\bar{A}_{HO}$ оброблюються модулем керування націпним обладнанням (МКНО), а отриманий сигнал $\bar{U}_{PM}$ передається до блоку керування націпним обладнанням (БКНО).

Зворотний зв'язок між оператором та системою керування АНПА-РБ реалізовано системою відображення інформації, яка входить до ІК і складається з одного або декількох графічних дисплеїв. Таким чином інформація отримана від націпного обладнання $\bar{D}_{HO}$, дані про стан АНПА $\bar{D}_{АНПА}$, його координати $\bar{P}_{АНПА}$ та кутова орієнтація $\bar{H}_{АНПА}$ інтерпретуються у графічному виді $\bar{G}$.

Контрольно-аварійна система (КАС) призначена для захисту обладнання від помилкових дій оператора та керування апаратом в аварійних режимах.

До аварійних режимів роботи відносяться:

- відмова одного або декількох виконавчих механізмів;
- втрата сигналу від ІК;
- невеликий запас заряду акумулятора.

КАС приймає ті ж самі сигнали, що й ІК, але в цифровому виді. При втраті з'єднання з інтерфейсом керування КАС отри-

мує дані від сенсорів $\bar{D}_{HO}$ та архівує їх. При тривалій втраті зв'язку з ІК контрольно-аварійна система виконує функцію керування рухом апарата для повернення його в точку базування $\bar{P}_0$.

Тактичний рівень оброблює задач, поставлені стратегічним рівнем, формує команди для виконавчого рівня та забезпечує зворотний зв'язок зі стратегічним рівнем.

Контроль за виконанням поставленого завдання покладено на система слідування за місією (ССМ). Задачею даної системи є зміна режимів роботи націпного обладнання R_{HO} , а також зміна заданої координати робочої точки $\bar{P}_3$ за інформацію від стратегічного рівня ($\bar{P}_M$ та $\bar{R}_M$), поточним положенням АНПА $\bar{P}_{АНПА}$ та його кутовою орієнтацією $\bar{H}_{АНПА}$.

Рух до заданої точки $\bar{P}_3$ забезпечує система позиціонування в робочій точці (СПРТ), яка передає виконавчому рівневі курс φ_3 , яким повинен рухатись АНПА-РБ та вектор швидкості поступального його руху $\bar{V}_3$, який включає маршову та вертикальну її складові.

Блок обробки даних (БОД) отримує інформацію від сенсорів $\bar{D}_d$, коригує його і переводить цей сигнал в фізичні величини. Корекція отриманих даних досягається порівнянням показань декількох однотипних сенсорів та їх фільтрацією. Основними даними є поточне положення АНПА $\bar{P}_{АНПА}$ та його кутова орієнтація $\bar{H}_{АНПА}$.

Задачею виконавчого рівня є формування сигналів керування для пристроїв керування механізмами АНПА та його націпним обладнанням. Формат сигналів керування залежить від встановленого обладнання.

Блок керування націпним обладнанням є посередником між оператором та тактичним рівнем САК, який встановлює заданий режим роботи націпного обладнання та виконує первинну обробку сигналів його сенсорів.

Задачею САК плоским вертикальним рухом з поворотом (ПВР) є визначення сигналу керування для двигунів РКК $\bar{U}_{РКК}$, який забезпечує рух АНПА заданим курсом φ_3 із заданою швидкістю поступального руху $\bar{v}_3$.

Система стабілізації диферента (ССД) забезпечує утримання АНПА–РБ в горизонтальному положенні під час його руху (як маршового так і вертикального) за допомогою зміни кута α повороту ГР.

Вхідними величинами для даної системи є диферент АНПА ψ та вектор швидкості набігаючого потоку води $\bar{v}_{НА}$. Встановлення положень ГР забезпечується сервоприводами, тому в додатковому регулюванні в структурі САК немає потреби.

Оптимальна довжина КБ для АНПА–РБ залежить безпосередньо від глибини занурення [57], тому вхідними сигналами для САК КЛ є глибина занурення h , та швидкість занурення v_y . Інформація про швидкість занурення АНПА використовується для забезпечення стійкості оптимальної довжини випущеної частини КБ. В якості зворотного зв'язку від кабельної лебідки використовується швидкість обертання її електроприводу $\omega_{лбпг}$ та довжина випущеної частини КБ $L_{КБ}$.

Інструментальний рівень включає в себе систему сенсорів та виконавчих механізмів, що розташовані на АНПА та забезпечують його діагностику та виконання поставлених задач.

Для забезпечення функціонування ієрархічної САК, в першу чергу, необхідно синтезувати її модулі із врахуванням особливостей конструкції АНПА–РБ як нового об'єкту автоматичного керування. Таким чином задачею дослідження є синтез модулів систем автоматичного керування, які забезпечать якісні рух та позиціонування АНПА–РБ в просторі.

У виконавчому рівні до таких систем належать

- система автоматичного керування КЛ, оскільки необхідно підтримувати оптимальну довжину КБ при зміні глибини занурення;

- система стабілізації диферента через необхідність пристосування САК до різних режимів роботи самохідних підводних апаратів;
- система автоматичного керування ПВР, яку необхідно удосконалити для більш ефективного горизонтального руху відповідно до обраної структури РКК та вхідних сигналів керування.

На тактичному рівні САК за керування рухом АНПА-РБ відповідає СПРТ, синтез якої ускладнено відсутністю у складі РКК рушіїв, які мають забезпечувати лаговий рух підводного апарата.

Розділ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ «АВТОНОМНИЙ НЕНАСЕЛЕНИЙ ПІДВОДНИЙ АПАРАТ – КАБЕЛЬ-БУКСИР – РАДІОБУЙ»

2.1 Розробка структури математичної моделі

Математична модель системи АНПА-КБ-РБ реалізує динаміку двох твердих тіл (АНПА та РБ), які рухаються у просторі, та гнучкої лінії (КБ), що їх з'єднує (рис 2.1).

Радіобуй в своєму складі не має активних засобів для руху, єдиною рушійною (буксированою) силою для РБ є сила натягу КБ. Для запобігання занурення на глибину використовуються крила, які утримують РБ на поверхні при його русі, а хвостові стабілізатори забезпечують додатковий момент опору, що протидіє появі крену та диференту. Відновлення горизонтального положення та додаткову силу виштовхування забезпечує блок плавучості (БП).

Математична модель радіобуя описує динаміку руху твердого тіла у водному просторі, де:

- $\vec{P}_{РБ}$ – координати центра мас радіобуя, м;
- $\vec{v}_{РБ}$ – вектор швидкості радіобуя, м/с;
- $\vec{H}_{РБ}$ – кутова орієнтація радіобуя, рад;
- $\vec{\Omega}_{РБ}$ – вектор швидкості обертання радіобуя, 1/с.

На корпус РБ діють наступні вектори сили та моменту:

- дії КБ ($\vec{F}_{КБ}, \vec{M}_{КБ}$), що є головною рушійною силою для РБ;
- гідродинамічного та повітряного опору РБ (ГДР) ($\vec{F}_{ГДР}, \vec{M}_{ГДР}$);
- ваги та блоку плавучості ($\vec{F}_{БП}, \vec{M}_{БП}$);

- хвостових стабілізаторів (ХС) ($\vec{F}_{ХС}, \vec{M}_{ХС}$);
- крила (КР), ($\vec{F}_{КР}, \vec{M}_{КР}$);
- зовнішніх збурень (ЗЗ), в якості яких виступають хвилі $\vec{F}_{ХВ}, \vec{M}_{ХВ}$.

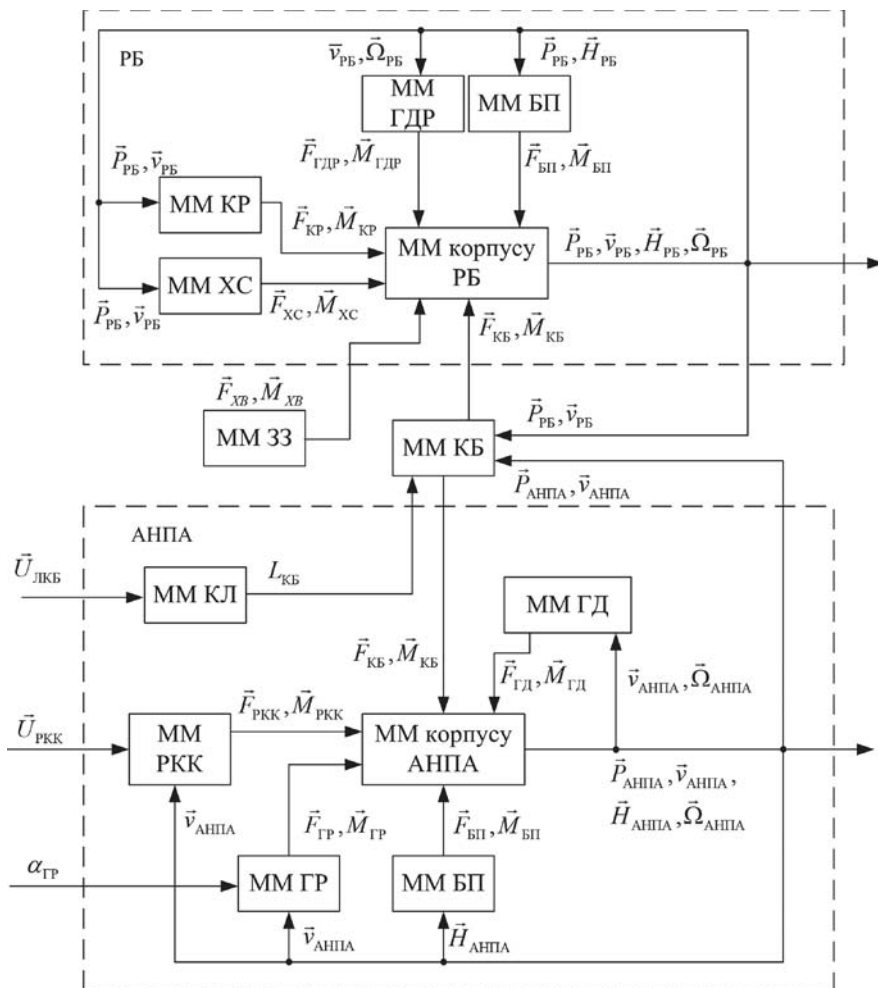


Рисунок 2.1 – Структура математичної моделі

Оскільки РБ рухається в приповерхневому шарі води, прийемо припущення про те, що густина води в такому режимі його руху дорівнює густині повітря. Таким чином вдасться уникнути подальшого спливання РБ при досягненні ним межі двох середовищ – водного та повітряного.

Математична модель корпусу АНПА також описується законами динаміки руху твердого тіла в просторі. Кінематичні параметри, які будуть отримані в результаті моделювання, наступні:

- $\vec{P}_{\text{АНПА}}$ – координати центра мас АНПА, м;
- $\vec{v}_{\text{АНПА}}$ – вектор швидкості поступального руху АНПА, м/с;
- $\vec{H}_{\text{АНПА}}$ – кутова орієнтація АНПА, рад;
- $\vec{\Omega}_{\text{АНПА}}$ – вектор швидкості обертового руху АНПА, 1/с.

На корпус АНПА діють як зовнішні, так і внутрішні сили та моменти:

- натягу КБ ($\vec{F}_{\text{КБ}}, \vec{M}_{\text{КБ}}$);
- гідродинамічного опору (ГО) ($\vec{F}_{\text{ГД}}, \vec{M}_{\text{ГД}}$);
- ваги та блоку плавучості ($\vec{F}_{\text{БП}}, \vec{M}_{\text{БП}}$);
- горизонтальних рулів ($\vec{F}_{\text{ГР}}, \vec{M}_{\text{ГР}}$);
- дії РКК ($\vec{F}_{\text{РКК}}, \vec{M}_{\text{РКК}}$).

На відміну від РБ, математична модель АНПА враховує вплив не тільки зовнішніх сил, а й виконавчих механізмів, до яких відносяться:

- РКК, який складається з двох маршових рушіїв, розташованих в кормовій частині АНПА (забезпечують маршовий рух та поворот апарата в горизонтальній площині), та одного вертикального, упор якого проходить через центр мас АНПА та забезпечує тільки вертикальний рух;
- ГР, які знаходяться в кормовій частині АНПА. Обертання ГР здійснюється сервоприводами;
- КЛ – механізм який забезпечує зміну довжини випущеної частини КБ. До його складу входить математична модель механізму барабану та електродвигуна.

2.2 Опис систем координат

Математична модель системи АНПА–КБ–РБ описується в чотирьох системах координат (СК) (рис. 2.2). Це пояснюється відмінністю задач та математичного опису рухомих об'єктів. Так при дослідженні переміщення та взаємного розташування АНПА і РБ доцільно використовувати базову систему координат, а для визначення сил, які діють на АНПА або РБ – зв'язану з об'єктом систему координат. Тому, опис математичної моделі доцільно розглядати в наступних системах координат:

- базова система координат (БСК) $O_b x_b y_b z_b$;
- зв'язана система координат (ЗСК) АНПА $O_{av} x_{av} y_{av} z_{av}$;
- зв'язана система координат РБ $O_{ab} x_{ab} y_{ab} z_{ab}$;
- проміжна система координат (ПСК) $O_m x_m y_m z_m$;
- кабельна система координат $O_c x_c y_c z_c$.

Загальний рух АНПА РБ моделюється в земній базовій системі координат. Початок даної системи координат зв'язаний з деякою точкою на поверхні Землі, вісь $O_b y_b$ є продовження радіуса-вектора, що йде від центра Землі. Осі $O_b x_b$ та $O_b z_b$ лежать у площині горизонту, вісь $O_b x_b$ завжди спрямована на північ, а вісь $O_b z_b$ становить із першими двома осями праву систему координат.

Проміжною СК для розрахунку також може виступати напівзв'язана СК $O_m x_m y_m z_m$. Особливістю даної СК є те, що її початок з'єднаний з центром мас рухомого об'єкта (АНПА або РБ), а координатні осі паралельні БСК, або вісь $O_m x_m$ може бути повернена у горизонтальній площині на кут заданого курсу.

Точки відліку зв'язаних систем координат АНПА (O_{ab}) та РБ (O_{av}) суміщені з центрами мас корпусів відповідних твердих тіл та переміщується разом з ними. Осі даних СК співпадають з основними осями інерції відповідних тіл: осі $O_{ab} x_{ab}$ та $O_{av} x_{av}$ спрямовано до носової частини, $O_{ab} y_{ab}$ та $O_{av} y_{av}$ – вертикально вгору, $O_{ab} z_{ab}$ та $O_{av} z_{av}$ – утворюють праву систему координат разом з осями $O_{ab} x_{ab}$ та $O_{ab} y_{ab}$ для РБ і $O_{av} x_{av}$ та $O_{av} y_{av}$ – для АНПА.

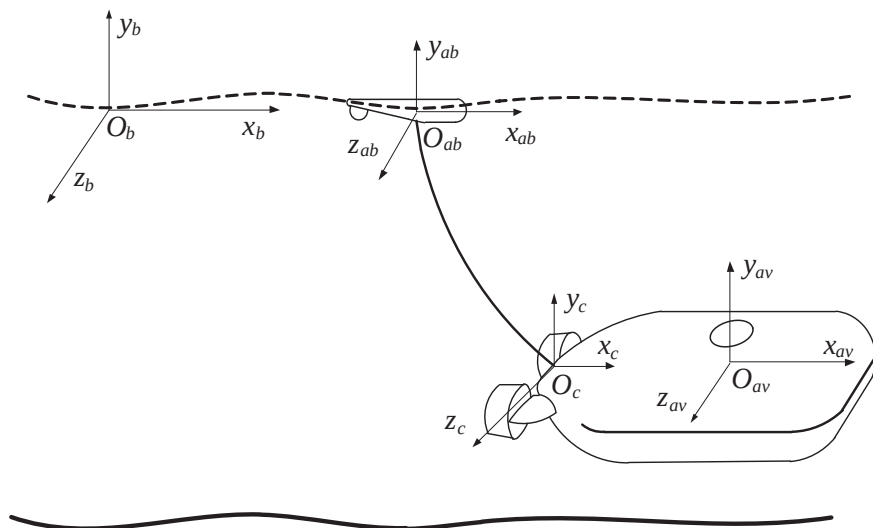


Рисунок 2.2 – Системи координат математичної моделі

Для моделювання впливу КБ на корпус АНПА та РБ використовується кабельна система координат (КСК) [60]. Оскільки, КБ не використовує обтічників, прийнято, що він має гладку циліндричну форму. Тоді можливо прийняти припущення про відсутність бокової складової гідродинамічної сили. Отже, КСК може бути використана для математичного моделювання КБ на основі математичної моделі його плоского руху. Початок координат O_c даної СК зв'язаний з корінним кінцем КБ, який розташовано на АНПА, та переміщується разом з ним. Вісь $O_c x_c$ паралельна швидкості потоку води, що набігає, і спрямована в протилежному напрямі, а вісь $O_c y_c$ – перпендикулярна $O_c x_c$ і розташована так, що ходовий кінець КБ завжди знаходиться у третій або у четвертій чверті площини $x_c O_c y_c$. Вісь $O_c z_c$ утворює з ними праву прямокутну систему координат. Випущена частина КБ розташовується в площині $O_c x_c y_c$.

Для переходу між СК використовуються бази відповідно до [60]. Бази систем координат утворюються одиничними

векторами: $B = \{\hat{i}_b, \hat{j}_b, \hat{k}_b\}$ – базис БСК, $M = \{\hat{i}_m, \hat{j}_m, \hat{k}_m\}$ – базис ПСК, $A_b = \{\hat{i}_{ab}, \hat{j}_{ab}, \hat{k}_{ab}\}$ – базис ЗСК РБ, $A_v = \{\hat{i}_{av}, \hat{j}_{av}, \hat{k}_{av}\}$ – базис ЗСК АНПА, $C = \{\hat{i}_c, \hat{j}_c, \hat{k}_c\}$ – базис КСК.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в БСК:

$$\hat{i}_b = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_b = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_b = \{0, 0, 1\}.$$

Тоді базис $B = \{\hat{i}_b, \hat{j}_b, \hat{k}_b\}$ є базисом земної базової СК векторного простору $\mathbb{R}^3$.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в проміжній СК:

$$\hat{i}_m = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_m = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_m = \{0, 0, 1\}.$$

Тоді базис $M = \{\hat{i}_m, \hat{j}_m, \hat{k}_m\}$ є базисом ПСК векторного простору $\mathbb{R}^3$. Базис M співпадає з базисом B , якщо курсовий кут $\kappa = 0$.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в ЗСК РБ:

$$\hat{i}_{ab} = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_{ab} = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_{ab} = \{0, 0, 1\}.$$

Тоді базис $A_b = \{\hat{i}_{ab}, \hat{j}_{ab}, \hat{k}_{ab}\}$ є базисом ЗСК РБ векторного простору $\mathbb{R}^3$.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в ЗСК АНПА:

$$\hat{i}_{av} = \{1, 0, 0\}; \hat{j}_{av} = \{0, 1, 0\}; \hat{k}_{av} = \{0, 0, 1\}.$$

Тоді базис $A_v = \{\hat{i}_{av}, \hat{j}_{av}, \hat{k}_{av}\}$ є базисом ЗСК АНПА векторного простору $\mathbb{R}^3$.

Введемо три одиничних вектора з наступними координатами в КСК:

$$\hat{i}_c = \{1, 0, 0\}; \quad \hat{j}_c = \{0, 1, 0\}; \quad \hat{k}_c = \{0, 0, 1\}.$$

Тоді базис $C = \{\hat{i}_c, \hat{j}_c, \hat{k}_c\}$ є базисом КСК векторного простору $\mathbb{R}^3$.

Якщо задано деякий вектор $\vec{h}$, то при переході від одного базису векторного простору до іншого змінюються і його координати:

$$\begin{aligned} \vec{h} = \{x_b, y_b, z_b\}_B &= \{x_m, y_m, z_m\}_M = \{x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}\}_{A_b} = \\ &= \{x_{av}, y_{av}, z_{av}\}_{A_v} = \{x_c, y_c, z_c\}_C, \end{aligned}$$

де x_b, y_b, z_b – проекції вектора $\vec{h}$ на відповідні осі БСК; x_m, y_m, z_m – проекції вектора $\vec{h}$ на відповідні осі ПСК; x_{ab}, y_{ab}, z_{ab} – проекції вектора $\vec{h}$ на відповідні осі ЗСК РБ; x_{av}, y_{av}, z_{av} – проекції вектора $\vec{h}$ на відповідні осі ЗСК АНПА; x_c, y_c, z_c – проекції вектора $\vec{h}$ на відповідні осі КСК.

Індекси B, M, A_b, A_v, C показують, по відношенню до якого базису подано чисельні значення координат векторів.

Якщо відомі координати вектора $\vec{h}$ в одному з базисів, то за допомоги рівнянь зв'язку між системами координат можна знайти його координати в інших базисах за умови, що зв'язок між системами координат також відомий.

Моделювання усталеного просторового руху КТ нульової плавучості здійснюється на основі його плоскої математичної моделі. Для цього виконується перехід до просторових координат із застосуванням рівнянь зв'язку між базовою землею СК та КСК. Початок КСК співпадає з корінним кінцем КБ, а її орієнтація визначається векторами швидкості потоку води, що набігає, $\vec{v}$ та координат ходового кінця $\vec{r}_{fast}$ (для інверсного моделю-

вання) або сили натягу на ходовому кінці КБ $\vec{F}_{fast}$ (для прямого моделювання):

$$\begin{aligned}\hat{i}_c &= \{i_{cx}, i_{cy}, i_{cz}\}_B = \text{ort}(-\vec{v}); \\ \hat{k}_c &= \{k_{cx}, k_{cy}, k_{cz}\}_B = \text{ort}(\vec{r}_{fast} \times \hat{i}_c) = \text{ort}(-\vec{F}_{fast} \times \hat{i}_c); \\ \hat{j}_c &= \{j_{cx}, j_{cy}, j_{cz}\}_B = \text{ort}(\hat{k}_c \times \hat{i}_c),\end{aligned}$$

де $\hat{i}_c, \hat{j}_c, \hat{k}_c$ – базові вектори КСК; ort – векторна функція, яка розраховує одиничний вектор.

При інверсному моделюванні КБ на початку розрахунку координати вектора $\vec{r}_{fast}$ переводяться в КСК:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{fast} &= \{x_b, y_b, z_b\}_B = \{x_{fast}, y_{fast}, z_{fast}\}_C; \\ \begin{bmatrix} x_{fast} \\ y_{fast} \\ z_{fast} \end{bmatrix} &= K_{CB}^{-1} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}; \quad K_{CB}^T = \begin{bmatrix} i_{cx} & i_{cy} & i_{cz} \\ j_{cx} & j_{cy} & j_{cz} \\ k_{cx} & k_{cy} & k_{cz} \end{bmatrix}; \\ \hat{i}_c &= \{i_{cx}, i_{cy}, i_{cz}\}_B; \quad \hat{j}_c = \{j_{cx}, j_{cy}, j_{cz}\}_B; \quad \hat{k}_c = \{k_{cx}, k_{cy}, k_{cz}\}_B,\end{aligned}$$

де $\hat{i}_c, \hat{j}_c, \hat{k}_c$ – базисні вектори базису КСК, K_{CB} – матриця зв'язку між КСК та земною базовою СК.

Координата z_{fast} завжди дорівнюватиме нулю, оскільки всі елементи КБ знаходяться в площині $x_c O_c y_c$ КСК. На основі плоскої інверсної моделі КБ розраховуються елементи вектора сили натягу на ходовому кінці КБ $\vec{F}_{fast} = \{F_{fast(x)}, F_{fast(y)}, 0\}_C$, після чого вони переводяться в БСК:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = K_{CB} \begin{bmatrix} F_{fast(x)} \\ F_{fast(y)} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

При прямому моделюванні КБ спочатку координати вектора $\vec{F}_{fast}$ переводяться в КСК, далі розраховуються плоскі координати $\vec{r}_{fast}$, які потім переводяться в БСК.

Зв'язок між БСК та кожною ЗСК можна виразити за допомогою кутів Ейлера, що виражаються в повороті проти часової стрілки навколо кожної осі:

- кут рискання (курс) φ – кут між проекцією зв'язаної осі Ox_{ab} або Ox_{av} на горизонтальну площину і віссю Ox_b ;
- кут диферента (тангажа) ψ – кут між зв'язаною віссю Ox_{ab} або Ox_{av} і горизонтальною площиною напівзв'язаної СК $O_m x_m z_m$ та віссю $O_m x_m$;
- кут крену θ – кут між діаметральною площиною об'єкта і вертикальною площиною, що включає в себе зв'язану вісь Ox_{ab} або Ox_{av} .

Система рівнянь кінематичного зв'язку обертового вектору $\vec{\Omega} = \{\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z\}_R$ об'єкта в ЗСК та ПСК в матричній формі має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{bmatrix} = B_{\omega}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

де

$$B_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \\ 0 & -\cos \psi \sin \theta & \cos \psi \end{bmatrix}.$$

Для вектора поступального руху $\vec{V} = \{v_x \quad v_y \quad v_z\}_R$ рівняння кінематичного зв'язку приймуть вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = B_V^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

де

$$B_V^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}.$$

Використання формул та дає змогу переводити параметри руху із ЗСК в БСК. Таким чином розглядається рух системи АНПА–КБ–РБ відносно нерухомої точки, а також визначається взаємне розташування АНПА та РБ.

2.3 Динаміка руху АНПА–РБ

З позиції керування як АНПА, так і РБ розглядаються як абсолютно тверде тіло. Тому силову взаємодію між окремими елементами корпусу кожного з об'єктів не враховано. Для моделювання руху корпусу РБ та АНПА застосовано закони класичної механіки. Земна базова СК приймається як основна інерційна система відліку.

Корпуси АНПА та РБ розглядаються, відповідно до законів механіки твердого тіла, в тривимірному просторі з шістьма ступенями свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центра мас об'єкта, інші три – обертання твердого тіла відносно центра мас. Кожному ступеню свободи відповідає одна швидкісна координата, у ролі якої виступає проекція вектора швидкості поступального або обертального руху на відповідну вісь ЗСК:

$$m_{xr} \frac{dv_x}{dt} + m_{zr} \omega_y v_z - m_{yr} \omega_z v_y = \Sigma F_x;$$

$$m_{yr} \frac{dv_y}{dt} + m_{xr} \omega_z v_x - m_{zr} \omega_x v_z = \Sigma F_y;$$

$$m_{zr} \frac{dv_z}{dt} + m_{yr} \omega_x v_y - m_{xr} \omega_y v_x = \Sigma F_z;$$

$$J_{xr} \frac{d\omega_x}{dt} = \Sigma M_x;$$

$$J_{yr} \frac{d\omega_y}{dt} + \omega_x \omega_z (J_{xr} - J_{zr}) + v_x v_z (m_{xr} - m_{zr}) = \Sigma M_y;$$

$$J_{zr} \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \omega_y (J_{yr} - J_{xr}) + v_x v_y (m_{yr} - m_{xr}) = \Sigma M_z,$$

де m_{xr} , m_{yr} , m_{zr} – відповідна маса АНПА та РБ з приєднаними масами води по відповідним осям ЗСК; v_x , v_y , v_z – проекції вектора $\vec{v}$ на відповідні осі ЗСК АНПА та РБ; ω_x , ω_y , ω_z – проекції вектора $\vec{\Omega}_{\text{АНПА}}$ на відповідні осі ЗСК АНПА та РБ; J_{xr} , J_{yr} , J_{zr} – моменти інерції АНПА та РБ з приєднаними моментами інерції відносно відповідних осей ЗСК.

Як на АНПА так і на РБ діють сили які мають однакове походження. До них відносяться:

- сили гідродинамічного опору;
- сили ваги та плавучості;
- опір КБ;
- гідродинамічний опір конструктивних елементів – до таких конструктивних елементів в РБ відносяться хвостові стабілізатори та крило, а для АНПА – горизонтальні рулі. Всі конструктивні елементи описуються ММ гідродинамічного крила (ГК).

Гідродинамічні сили та моменти опору з'являються внаслідок руху твердого тіла в оточуючому середовищі. Складові векторів сил

$$\vec{F}_{ГД} = \{F_{ГДx}, F_{ГДy}, F_{ГДz}\}_{A_b}$$

і моментів

$$\vec{M}_{\Gamma Д} = \{M_{\Gamma Дx}, M_{\Gamma Дy}, M_{\Gamma Дz}\}_{A_b}$$

опору гідродинамічного походження на вісі зв'язаної СК:

$$F_{\Gamma Дx} = -0,5k_{Fx}\rho S_x v_x \cdot |v_x|;$$

$$F_{\Gamma Дy} = -0,5k_{Fy}\rho S_y v_y \cdot |v_y|;$$

$$F_{\Gamma Дz} = -0,5k_{Fz}\rho S_z v_z \cdot |v_z|;$$

$$M_{\Gamma Дx} = -0,5k_{Mx}\rho S_x L_x \omega_x \cdot |\omega_x|;$$

$$M_{\Gamma Дy} = -0,5k_{My}\rho S_y L_y \omega_y \cdot |\omega_y|;$$

$$M_{\Gamma Дz} = -0,5k_{Mz}\rho S_z L_z \omega_z \cdot |\omega_z|,$$

де $k_{Fx,y,z}$ та $k_{Mx,y,z}$ – відповідно коефіцієнти проєкцій сил і моментів гідродинамічного походження на вісі ЗСК; ρ – густина води; $S_{x,y,z}$ – характерна площа АПНА та зануреної частини РБ; $L_{x,y,z}$ – характерна довжина АПНА та РБ.

Сили ваги F_m завжди направлена вертикально вниз та не створює моментів обертання. Дану силу можна розрахувати за формулою:

$$F_m = m_{\text{АПНА}} \cdot g;$$

де $m_{\text{АПНА}}$ – маса підводного апарата; g – прискорення вільного падіння.

Сила плавучості F_ρ направлена вертикально догори та розраховується за формулою:

$$F_\rho = \rho \cdot V_K \cdot g;$$

де V_K – об'єм корпусу твердого тіла, зануреного в воду.

Загальні вектори сили $\vec{F}_{\text{БП}} = \{F_{\text{БП}x}, F_{\text{БП}y}, F_{\text{БП}z}\}_{A_b}$ та моменти $\vec{M}_{\text{БП}} = \{M_{\text{БП}x}, M_{\text{БП}y}, M_{\text{БП}z}\}_{A_b}$, що викликані силами ваги та плавучості розраховуються за формулами:

$$F_{\text{БП}x} = (F_p - F_g) \sin(\psi);$$

$$F_{\text{БП}y} = (F_p - F_g) \cos(\psi) \cos(\theta);$$

$$F_{\text{БП}z} = -(F_p - F_g) \cos(\psi) \sin(\theta);$$

$$M_{\text{БП}x} = -F_p z_b \cos(\psi) \cos(\theta) - F_p y_b \cos(\psi) \sin(\theta);$$

$$M_{\text{БП}y} = F_p x_b \cos(\psi) \sin(\theta) + F_p z_b \sin(\psi);$$

$$M_{\text{БП}z} = F_p x_b \cos(\psi) \cos(\theta) - F_p y_b \sin(\psi),$$

де x_b, y_b, z_b – координати точки прикладення сили плавучості відносно центру мас АНПА та РБ відповідно.

Для розрахунку сил які діють на РБ та АНПА використовується інверсна модель КБ. Відповідно до [61] сили натягу на кінцях гнучкого зв'язку мають однакову силу та протилежний напрямок. Таким чином, використовуючи [62], отримуємо інверсну модель КБ у вигляді залежності:

$$\vec{F}_{fast} = \vec{f}(\vec{r}_{fast}, \vec{v}, L_{\text{КБ}}),$$

де $L_{\text{КБ}}$ – довжина випущеної частини КБ, $\vec{r}_{fast}$ – координати ходового кінця КБ відносно корінного, що відповідає координатам РБ відносно точки кріплення КБ на АНПА. $\vec{F}_{fast}$ – вектор сили натягу КБ.

Отримання інверсну модель КБ шляхом аналітичних перетворень, або розв'язку, ускладнене, оскільки система рівнянь його прямої моделі розв'язується чисельними методами. У зв'язку з цим для інверсного моделювання КБ застосовуються засоби апроксимації та теорії подібності. Так в [62] представлено

інверсну модель усталеного руху КБ на основі коефіцієнтів подібності її параметрів:

$$k_L = \frac{L_{KB}}{L_{KB}^*}; \quad k_d = \frac{d}{d^*}; \quad k_C = \frac{C_n}{C_n^*} = \frac{C_t}{C_t^*}; \quad k_\rho = \frac{\rho}{\rho^*}; \quad k_v = \frac{v}{v^*};$$

$$k_{sim} = k_L k_d k_C k_\rho k_v;$$

$$\left. \begin{aligned} x_{fast}^* &= \frac{x_{fast}}{k_L}; \\ y_{fast}^* &= \frac{y_{fast}}{k_L}; \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{fast(x)} &= k_{sim} F_{fast(x)}^*; \\ F_{fast(y)} &= k_{sim} F_{fast(y)}^*; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

де $k_L, k_d, k_C, k_\rho, k_v$ – відповідно, коефіцієнти подібності по довжині КБ, діаметру КБ, коефіцієнтам нормальної або тангенціальної складової гідродинамічного опору КБ, густині води, швидкості потоку води; k_{sim} – коефіцієнт подібності силових характеристик КБ; $L_{KB}, d, C_n, C_t, \rho, v$ – задані параметри математичної моделі КБ; $L_{KB}^*, d^*, C_n^*, C_t^*, \rho^*, v^*$ – базові параметри математичної моделі КБ; x_{fast} та y_{fast} – задані складові вектора $\vec{r}_{fast}$ в плоскій постановці задачі; x_{fast}^* та y_{fast}^* – базові складові базового вектора координат ходового кінця КБ $\vec{r}_{fast}^*$ в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}$ та $F_{fast(y)}$ – шукані складові вектора $\vec{F}_{fast}$ в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ – відомі складові базового вектора сили натягу $\vec{F}_{fast}^*$ в плоскій постановці задачі.

Застосування коефіцієнтів подібності дає змогу апроксимувати інверсну модель КТ, прийнявши більшу частину його параметрів константними, що суттєво знизило її складність.

Таким чином, на вхід апроксимованої моделі КБ подаються тільки два параметри: x_{fast}^* та y_{fast}^* , які розраховуються за системою рівнянь. В результаті отримуються апроксимовані значення складових $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ базового вектора сили натягу $\vec{F}_{fast}^*$, на основі яких за системою рівнянь отримуються шукані складові вектора сили натягу $\vec{F}_{fast}$ в плоскій постановці.

Оскільки РБ рухається в приповерхневому шарі води, на його рух впливають зовнішні збурення від хвилювання водної поверхні. Змінними складовими хвильових збурень приймаються бокова сила F_{XB} та момент рискання M_{XB} , обумовлений хвилями [63]. При русі РБ при регулярних хвилях зі швидкістю v , курсовим кутом β при направленні до хвилі з частотою ω_{XB} і висотою 2ξ величини F_{XB} та M_{XB} визначаються за формулами:

$$F_{XB} = F_{XBmax} \cdot \cos(\omega_H t);$$

$$M_{XB} = M_{XBmax} \cdot \sin(\omega_H t),$$

де ω_H – частота хвилі, що набігає. Змінна ω_H визначається за виразом:

$$\omega_H = \omega_{XB} \left(1 - v \frac{\omega_{XB}}{g} \cos \beta \right),$$

де F_{XBmax} , M_{XBmax} – амплітуди бокової сили та моменту рискання, обумовленого хвильовими збуреннями:

$$F_{XBmax} = \rho \cdot g \cdot v \cdot c_f(\beta) \cdot \sin(\beta);$$

$$M_{XBmax} = g \cdot l \cdot k \cdot c_m(\beta) \cdot \sin(\beta),$$

де l – координати центра мас зануреного під воду; k – частота форми хвилі $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$; c_f , c_m – поправочні коефіцієнти, які приймають значення в діапазоні $[0; 1]$.

Сили керування РКК безпосередньо залежать від конструкції та взаємного розташування рушіїв АНПА. Найбільш розповсюдженою є трьохгвинтова структура РКК, який складається з двох маршових рушіїв та одного вертикального, рушійна сила якого проходить через центр мас АНПА.

Математична модель КЛ складається з моделей електродвигуна постійного струму з редуктором та барабана кабельної лебідки [57]:

$$\begin{aligned}L_{\text{КБ}} &= R \int \omega_{\text{Б}} dt + L_0; \\M_{\text{МР}} &= R |F_{\text{КБАПА}}|; \\J \frac{d\omega_{\text{Б}}}{dt} &= M_{\text{ЕД}} k_{\text{МР}} - M_{\text{МР}}; \\M_{\text{ЕД}} &= f(u_{\text{КЛ}}); \\v_L &= \frac{dL_{\text{КБ}}}{dt},\end{aligned}$$

де R – радіус барабана КЛ; L_0 – початкове значення довжини випущеної частини КБ.

Математична модель капсульованого ЕД описується наступними нелінійними диференціальними рівняннями [64, 65]:

$$\begin{aligned}L_{ep} \frac{di_{ep}}{dt} &= K_u u_{ep} - r_{ep} i_{ep} - \frac{c_{ep} \Phi_{ep}}{k_g} \omega_{ep}; \\J_{ep} \frac{d\omega_{ep}}{dt} &= M_{ep} - Q_{ep}; \\M_{em} &= c_{ep} \Phi_{ep} i_{ep}; \\M_{ep} &= \frac{1}{k_g} (M_{em} - Q_r); \\Q_r &= C_{qg} \pi \rho_d \omega^2 r^4 \cdot L,\end{aligned}$$

де L_{ep} – індуктивність якоря ЕД; i_{ep} – миттєве значення електричного струму якоря ЕД; K_u – коефіцієнт підсилення регулятора напруги ЕД; u_{ep} – керуючий сигнал регулятора напруги ЕД; r_{ep} – опір якоря ЕД; c_{ep} , F_{ep} – електромагнітні параметри ЕД; k_g – коефіцієнт передачі редуктора; ω_{ep} – частота обертання гребного гвинта; J_{ep} – сумарний момент інерції системи, приведений до ГГ; M_{em} – рушійний момент ЕД; M_{ep} – рушійний момент ЕД, приведений до ГГ; Q_r – гідродинамічний момент опору обертання ротора в маслі, що заповнює ЕД; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості масла; L_r , r – довжина та радіус ротора; C_{qg} – безрозмірний коефіцієнт моменту сил тертя (при $\delta 1 \ll r$, $\delta 1 \ll \delta 2$ і $r < L$ можна вважати, що $C_{qg} \approx 2/Re$); ρ_d – густина діелектрика.

Виходячи із взаємного розташування рушіїв вектор сил прийме вигляд $\vec{F}_{РКК} = \{F_{МП} + F_{МЛ}, F_B, 0\}$ [66], а вектор моменту рушійно-кермового комплексу – $\vec{M}_{РКК} = \{0, 0, 5l_m(F_{МП} - F_{МЛ}), 0\}$, де l_m – відстань між центрами гребних гвинтів маршових рушіїв.

Кожний електрорушійний привід (ЕРП) містить гребний гвинт (ГГ), який приводиться до руху капсульованим електродвигуном (ЕД) постійного струму з незалежним збудженням. Внутрішній простір ЕД для захисту від дії зовнішнього середовища заповнюється рідким діелектриком.

Математична модель ГГ має наступний вигляд:

$$J = \frac{2\pi V_{ep}}{\omega_{ep} D_{ep}}; \quad Q_{ep} = \begin{cases} \frac{K_Q \rho D_{ep}^5}{4\pi^2} \omega_{ep}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_q \rho D_{ep}^3 V_{ep}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases}$$

$$F_{ep} = \begin{cases} \frac{K_F \rho D_{ep}^4}{4\pi^2} \omega_{ep}^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ K_f \rho D_{ep}^2 V_{ep}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1), \end{cases} \quad (2.5)$$

де J – відносний поступ ГГ; V_{ep} – проекція вектора швидкості переміщення ЕРП відносно води на вісь прямого ходу ЕРП; D_{ep} – діаметр ГГ; Q_{ep} – гальмівний момент ГГ; $K_Q = f(J)$ та $K_q = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент гребного гвинта; ρ – питома щільність води; F_{ep} – рушійна сила (упор) гребного гвинта; $K_F = f(J)$ та $K_f = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують упор гребного гвинта.

Коефіцієнти K_Q , K_q , K_F , K_f є нелінійними і визначаються із графічних залежностей, які наведені на рис. 2.3 [63].

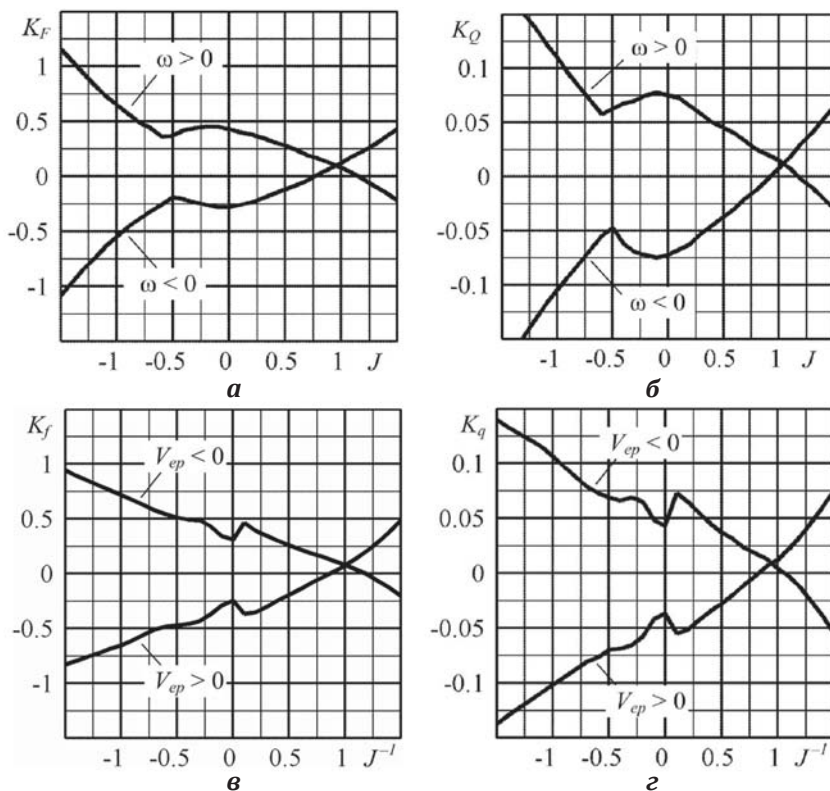


Рисунок 2.3 – Криві дії гребного гвинта:
а, б – для прямого режиму ЕРП; в, г – для реверсивного режиму ЕРП

Моделювання впливу ГК на АНПА зазвичай зводиться до урахування його підйомної сили, та сили лобового опору. Для моделювання впливу ГК на АНПА вводиться система координат, зв'язана з ГК, позначимо її базис літерою W . Її вісь абсцис спрямовується проти лобового опору ГК, вісь ординат спрямовується в напрямку підйомної сили ГК, вісь аплікату утворює з першими двома праву прямокутну систему координат.

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

$$\vec{F}_w = \{F_{wx}, F_{wy}\}_W; \quad \vec{v}_w = \{v_{wx}, v_{wy}\}_W;$$

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

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 підйомної сили ГК; α – кут атаки ГК; S – площа ГК.

Момент оберту, який виникає на корпусі АНПА під дією ГК, визначається за формулою

$$\vec{M}_w = \vec{r}_w \times \vec{F}_w,$$

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 [63]. В роботі використано профіль крила NACA0012.

2.4 Розробка комп'ютерної імітаційної моделі системи

Для моделювання роботи системи АНПА–КБ–РБ розроблено комп'ютерну імітаційну модель на основі *MatLab Simulink*. Використання даного програмного продукту дає змогу побудувати імітаційну модель з модульною структурою.

Верхній рівень імітаційної моделі (рис. 2.4) показує взаємодію між елементами системи АНПА–КБ–РБ та зовнішнім середовищем. Величини, представлені на даному рівні, показують параметри системи та оточуючого середовища в БСК. Вихідні сигнали представлено у матричному виді.

Моделювання оточуючого середовища на даному рівні представлено вектором швидкості течії (блок *Current velocity*) та моделювання хвильових збурень (блок *WaveModel*). Виходом блоку моделювання хвильових збурень є матриця розміром 2×3 , яка складається з вектора сил та вектора моментів

$$F_w = \begin{bmatrix} F_{wx} & F_{wy} & F_{wz} \\ M_{wx} & M_{wy} & M_{wz} \end{bmatrix}.$$

Сила на виході блоку *CableModel* представлена в виді матриці з координатами вектору натягу корінного кінця КБ $F_{fast} = [F_{cabx} \quad F_{caby} \quad F_{cabz}]$. Елементи матриці F_{fast} виражено в БСК.

На вхід блоку моделювання АНПА (*AUV*) подається вектор сили натягу КБ та, в якості глобальних змінних, передається вектор швидкості течії і густина води. На виході моделі отримуємо довжину випущеної частини КБ (*LKb*), матрицю положення

АНПА $P_{auv} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ \theta & \phi & \psi \end{bmatrix}$ та матрицю швидкостей

$$V_{auv} = \begin{bmatrix} v_{auvx} & v_{auvy} & v_{auvz} \\ \omega_{auvx} & \omega_{auvy} & \omega_{auvz} \end{bmatrix}.$$

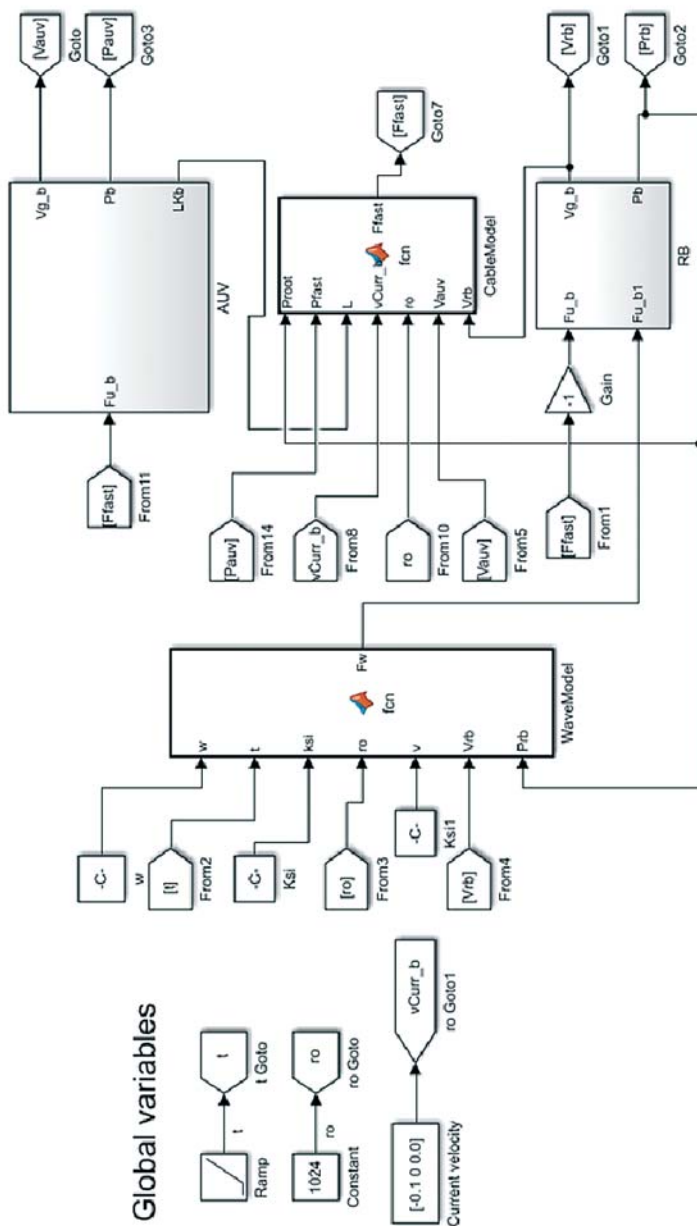


Рисунок 2.4 – Верхній рівень імітаційної моделі

На вхід математичної моделі КБ передаються хвильові збурення (Fw) та протилежно спрямований вектор сили натягу кабель-буксира ($-Ffast$). Аналогічно моделі АНПА, виходами моделі РБ виступають матриця положення РБ

$$Pb = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ \theta & \varphi & \psi \end{bmatrix}$$

та матриця швидкостей

$$Vrb = \begin{bmatrix} v_{rbx} & v_{rby} & v_{rbz} \\ \omega_{rbx} & \omega_{rby} & \omega_{rbz} \end{bmatrix}.$$

Взаємодія між системою керування та моделлю АНПА забезпечується за допомогою трьох сигнальних ліній (рис. 2.5).

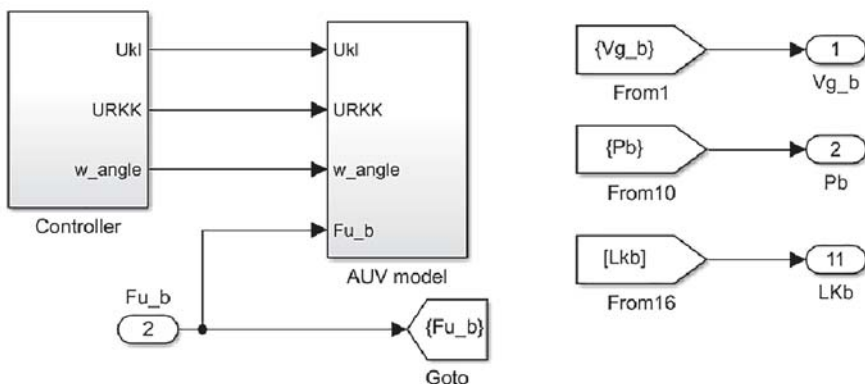


Рисунок 2.5 – Структура моделі АНПА

Сигнал керування виконавчими двигунами (U та $URKK$) є величиною напруги на заданих двигунах. Сигнал U передає напругу лише на один ЕД, а сигнал $URKK$ є матрицею напруг ЕРП ($URKK = [U_{left} \quad U_{right} \quad U_{vertikal}]$). Горизонтальні рулі приводяться до руху сервоприводами, тому сигналом керування ГР є кут їх повороту в градусах (w_angle).

Для зменшення кількості ліній зворотного зв'язку від моделі АНПА до системи керування, всі параметри блоку *AUV model*, які показують поточний стан АНПА задаються в вигляді глобальних змінних та можуть використовуватися в усьому блоку *AUV* (див. рис. 2.4).

Таким чином, математична та імітаційна моделі руху автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм розроблені на основі залучення відповідних моделей кабель-буксиру, радіобуя, кабельної лебідки, автономного ненаселеного підводного апарата та його рушійно-кермовому комплексу і можуть бути використані для дослідження ефективності систем автоматичного керування просторовим рухом АНПА-РБ.

Розділ 3

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВИКОНАВЧОГО РІВНЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ

3.1 Аналіз та обґрунтування задач виконавчого рівня

Основною задачею виконавчого рівня САК є забезпечення заданого режиму руху АНПА–РБ. Виходячи з конструкції його РКК, до цих режимів відносяться:

- прямолінійний маршовий рух з заданою швидкістю;
- прямолінійний вертикальний рух з заданою швидкістю;
- утримання заданого курсу.

На ефективність виконання даних задач суттєво впливає наявність крену та диферента.

Конструкція корпусу АНПА будується таким чином, щоб зовнішні збурення практично не впливали на появу крену. Для цього корпус АНПА будується симетричним відносно основної вертикальної площини, а КБ кріпиться в кормовій частині АНПА на головній осі ЗСК.

Появу надлишкового крену підводного апарата буде компенсувати відновлювальна сила його блоку плавучості, який встановлений у верхній частині апарата.

Поява диферента обумовлена силою натягу КБ, яка виникає під час руху АНПА. Для ефективної стабілізації диферента необхідно забезпечити мінімально можливий вплив від КБ компенсацією його поворотом кормових горизонтальних рулів.

Таким чином, до вказаних вище задач виконавчого рівня додаються наступні задачі:

- підтримання оптимальної за критерієм мінімізації сили гідродинамічного опору довжини КБ;
- стабілізація диферента за допомогою горизонтальних рулів.

Зменшення впливу КБ на систему АНПА–РБ пропонується реалізувати випусканням оптимальної (за критерієм мінімуму сили гідродинамічного опору) довжини КБ [67]. Це дає змогу зменшити не тільки диферентуючий момент, а й енергоспоживання РКК АНПА.

Для виявлення оптимальної довжини КБ проведено моделювання залежності сили його натягу від відношення довжини його випущеної частини до глибини занурення при різних швидкостях руху АНПА–РБ (рис. 3.1).

Отримані результати показують, що оптимальна довжина КБ при зміні глибини або швидкості потоку води, що набігає, змінюється в невеликих межах.

Таким чином, можна стверджувати, що оптимальна довжина КБ в залежності від глибини занурення АНПА при його квазі-стаціонарному русі становитиме $L_{\text{опт}} = 2,3Y$.

Відомо, що потужність, яка споживається електроприводом РКК, виражається через момент на його валу та частоту обертання:

$$N_{ep} = \frac{\omega_{ep} M_{ep}}{\eta_{ep}}.$$

Виходячи з (2.5), момент на валу та упор ГГ мають практично пряму залежність, тобто зменшення сили натягу КБ значно зменшить споживану потужність.

Вибір горизонтальних рулів для стабілізації диференту обумовлений енергоефективністю даної конструкції за рахунок того, що порівняно з вертикальними рушьями, сервоприводи споживають енергію тільки в перехідних режимах роботи.

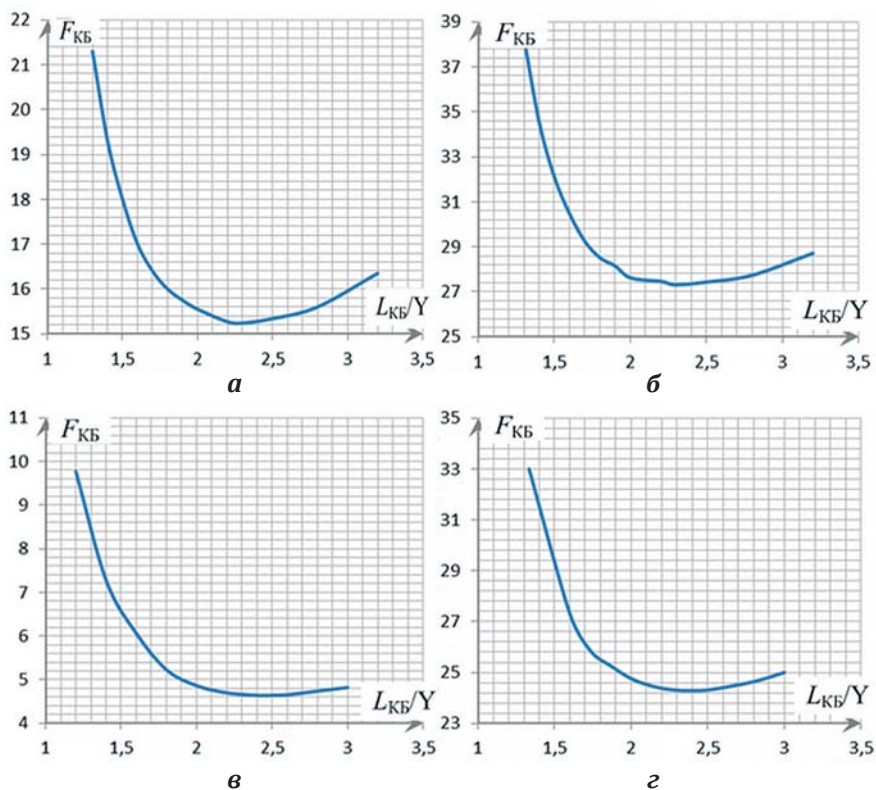


Рисунок 3.1 – Залежність сили натягу кабель-буксиру при горизонтальному русі АНПА:

а - $v_x = 0,75$, $h = 10$; б - $v_x = 0,1$, $h = 10$; в - $v_x = 0,75$, $h = 5$; г - $v_x = 0,75$, $h = 15$

Енерговитрати на компенсацію піднімальної сили для профілю крила NASA-0012 значно менші, ніж його власний опір у напрямку руху потоку води, що набігає.

Залежність коефіцієнтів опору від кута атаки, відповідно до [68], зображена на рисунку 3.2.

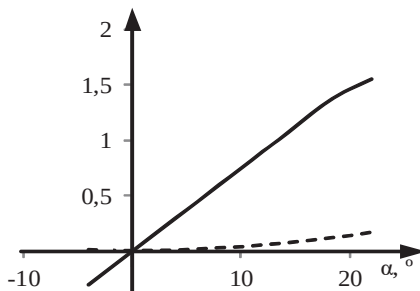


Рисунок 3.2 – Залежність гідродинамічних коефіцієнтів від кута атаки крила: - - - - - C_x ; — C_y

Виходячи з рис. 3.2, використання ГР, з невеликими відхиленнями від напрямку потоку води, що набігає, на порядок підвищує енергоефективність в порівнянні з використанням двох вертикальних рушіїв.

3.2 Синтез системи автоматичного керування кабельною лебідкою

Задачею САК КЛ є забезпечення та підтримання оптимальної за критерієм мінімізації сили гідродинамічного опору величини випущеної частини КБ в квазістаціонарних режимах роботи АНПА.

Таким чином, окрім задачі забезпечення оптимальної довжини випущеної частини КБ, виникає завдання контролю швидкості його випускання. Для вирішення поставлених задач запропоновано двоконтурну структуру САК (рис. 3.3).

Внутрішній контур системи підтримує задану швидкість обертання електродвигуна КЛ, а зовнішній – за глибиною та швидкістю занурення АНПА визначає бажану швидкість обертання електроприводу КЛ.

Задана швидкість для електродвигуна складається з двох складових: сигнал підтримки оптимальної довжини КБ з урахуванням вертикальної швидкості ($\omega_{\text{лбв}}$) та швидкість обертання для усунення поточної похибки $\omega_{\text{лб}}$.

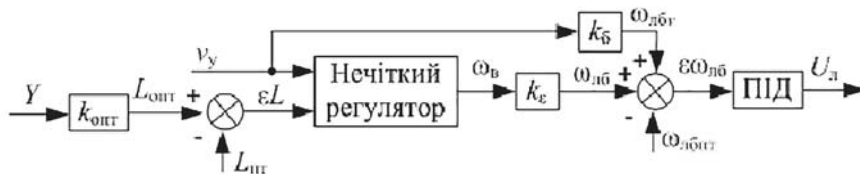


Рисунок 3.3 – Структура системи автоматичного керування кабельною лебідкою

Оптимальна довжина КБ $L_{\text{опт}}$ прямо пропорційна глибині занурення АНПА Y . За результатами моделювання КБ (див. п. 3.1) визначено, що $k_{\text{опт}} = 2,3$.

Різниця між оптимальною та поточною довжиною випущеної частини КБ εL надходить до нечіткого регулятора (рис. 3.4), а для підвищення швидкодії на його вхід подано швидкість вертикального руху АНПА v_y .

База правил для нечіткого регулятора представлена в вигляді табл. 3.1.

Виходячи з представлених функції належності та бази правил, залежність вхідного та вихідного сигналу набуває вигляду поверхні (рис. 3.5).

Сигнал на виході нечіткого регулятора підсилюється на величину k_ε . Даний коефіцієнт обирається рівним номінальній швидкості обертання електродвигуна КЛ.

Для підтримки оптимальної довжини випущеної частини КБ під час вертикального руху АНПА введено додатковий контур керування. Внутрішній контур на вході має вертикальну швидкість АНПА, яку підсилено в k_δ разів.

Коефіцієнт k_δ розраховується за формулою:

$$k_\delta = \frac{2,3 \cdot K}{R}, \quad (2.6)$$

де K – передаточне число редуктора барабана; R – радіус барабана.

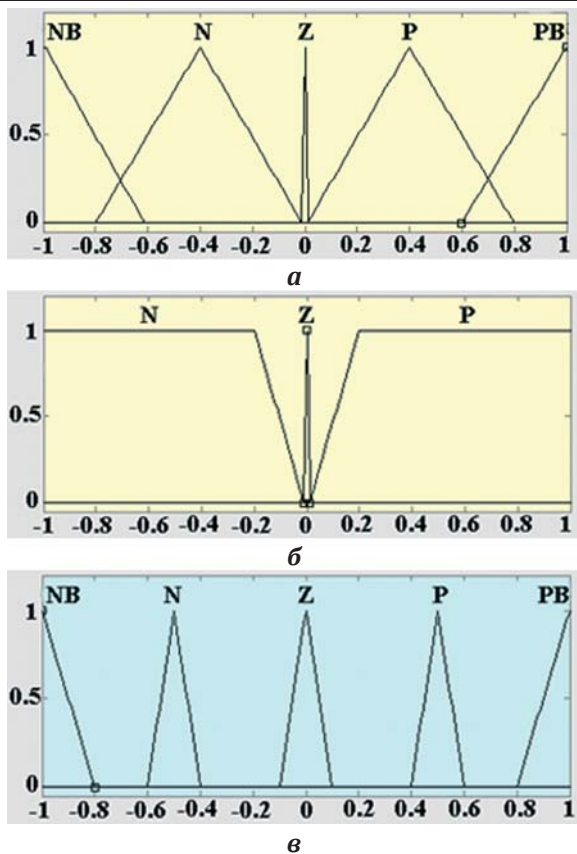


Рисунок 3.4 – Функції належності нечіткого регулятора:
a – похибка випущеної частини КБ εL ; *б* – швидкість занурення v_y ;
в – встановлення швидкості обертання ω_B

Таблиця 3.1 – База правил нечіткого регулятора оптимальної довжини КБ

$v_y \backslash \varepsilon L$	<i>NB</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>PB</i>
<i>N</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
<i>Z</i>	<i>NB</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>	<i>PB</i>
<i>P</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>

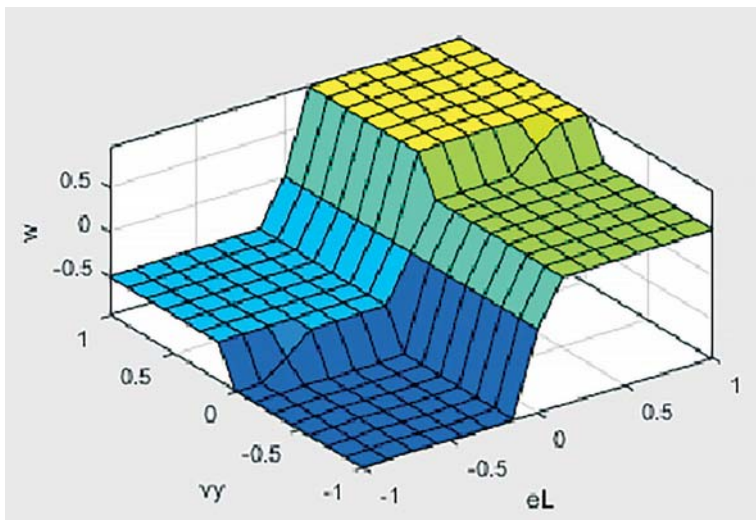


Рисунок 3.5 – Поверхня нечіткого виведення регулятора системи автоматичного керування кабельною лебідкою

Для керування двигуном постійного струму з незалежним збудженням використовується лінійний ПІД-регулятор.

Вибір лінійного ПІД-регулятора обумовлений простотою налаштування, а можливі недоліки використання даного регулятора вплинуть на роботу САК КЛ несуттєво, оскільки процеси, які проходять в електродвигуні значно швидші ніж механічні процеси в КЛ.

Коефіцієнти даного ПІД регулятора обрано методом Циглера – Нікольса.

Після корекції отримано наступні коефіцієнти ПІД регулятора: $k_p = 20$; $k_i = 240$; $k_d = 0,1$.

Робота внутрішнього контуру має значно вищу швидкодію (рис. 3.6), ніж перехідний процес механічної системи.

Працездатність запропонованого регулятора підтверджено імітаційним моделюванням на базі MatLab Simulink.

Структуру комп'ютерної реалізації САК представлено на рис. 3.7.

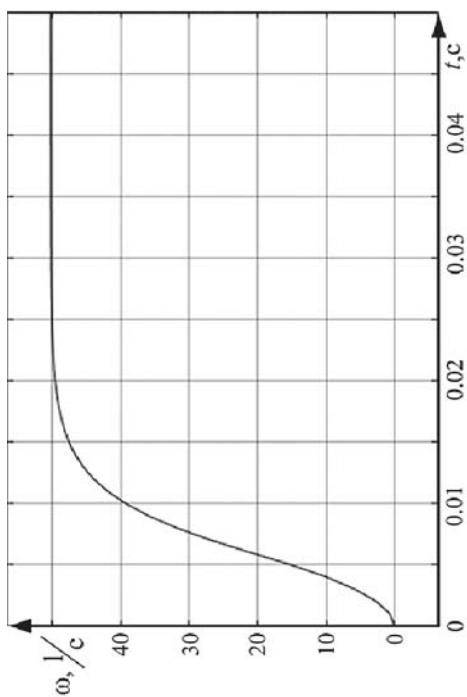


Рисунок 3.6 – Перехідний процес стабілізації швидкості обертання двигуна кабельної лебідки

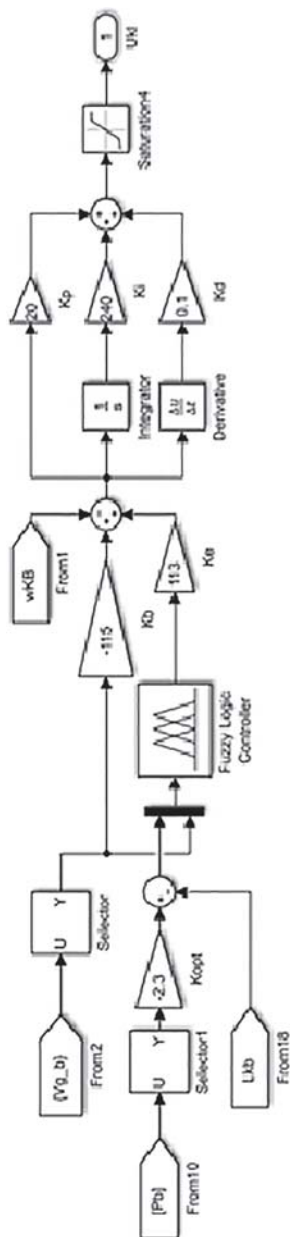


Рисунок 3.7 – Simulink модель системи автоматичного керування кабельною лебідкою

Вхідними параметрами регулятора в математичній моделі виступають:

- Lkb – поточна довжина випущеної частини КБ;
- wKB – поточна швидкість обертання електроприводу КБ;
- Pb – матриця положення АНПА, з якої за допомогою блоку *Selector1* обирається глибина його занурення (1 рядок 2 стовпчик);
- Vg_b – матриця швидкостей АНПА в БСК, з якої за допомогою блоку *Selector* обирається швидкість його занурення (1 рядок 2 стовпчик).

Коефіцієнт підсилення K_{opt} має постійне значення – 2,3 (див. рис. 3.6). Від’ємний знак в коефіцієнті переводить від’ємну координату Y в БСК до додатного значення глибини занурення.

Коефіцієнт Kb розраховується за формулою (2.6), а K_e – номінальна швидкість обертання обраного двигуна.

Для обмеження вихідного сигналу регулятора застосовано блок *Saturation4*. Обмеження встановлюються відповідно до номінальної напруги електроприводу КЛ. В математичній моделі обмеження встановлені від –220 В до +220 В.

Для перевірки ефективності роботи регулятора проведено математичне моделювання САК КЛ в різних режимах роботи.

Основні показники якості САК КЛ зведено до табл. 3.2.

Результати моделювання представлено на рис 3.8.

Таблиця 3.2 – Показники якості САК КЛ

№ з/п	Показник	v_y			
		0 м/с	–0,25 м/с	0,25 м/с	Синусоїдальний
1	Початкове відхилення, м	1,2	1	1	1
2	Тривалість процесу регулювання, с	0,9	0,9	0,48	0,5
3	Перерегулювання, %	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє

Автоматизація керування автономним ненаселеним
підводним апаратом з радіобуєм

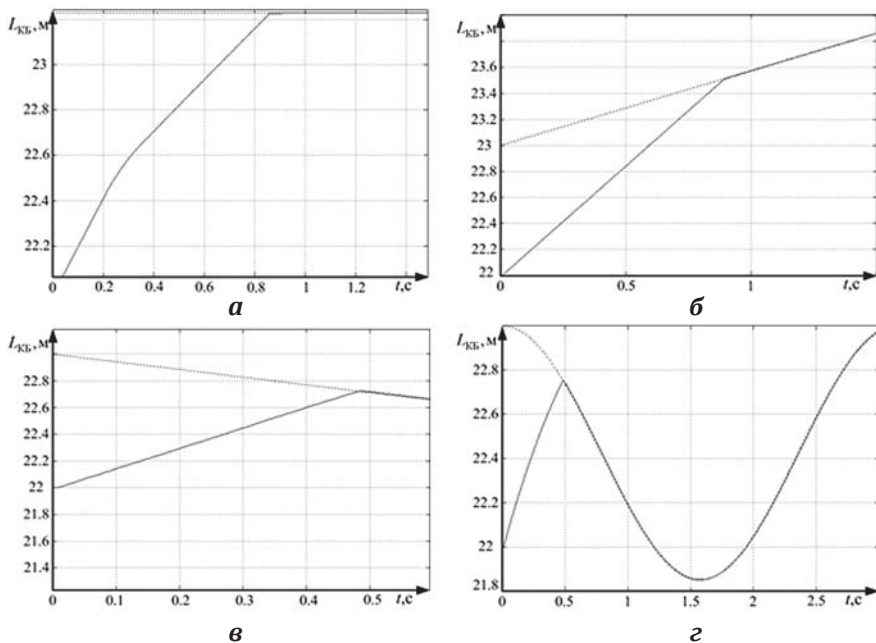


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси роботи системи автоматичного керування кабельною лебідкою:

----- – задане значення; ———— – діюче значення

а – $v_y = 0$; б – $v_y = -0,25$ м/с; в – $v_y = 0,25$ м/с; г – синусоїдальна форма

Результати моделювання підтверджують, що САК забезпечує швидку роботу регулятора та підтримує оптимальну довжину випущеної частини КБ при вертикальному русі апарата.

Диференційна складова ПД-регулятора спричиняє швидке переключення сигналу керування при переході похибки керування через «нуль», але ці випадки мають поодинокий характер і неістотно впливають на якість регулювання.

3.3 Синтез системи стабілізації диференту АНПА

Горизонтальні рулі АНПА повинні забезпечувати стабілізацію диферента в трьох основних режимах руху апарата: вертикальний, горизонтальний та спільний.

Оскільки горизонтальні рулі також створюють диферентуючий момент, особливо при вертикальному русі, необхідно забезпечити мінімальний вплив ГР на рух АНПА–РБ шляхом встановлення руля паралельно потоку води, що набігає, з подальшим відхиленням його від напрямку потоку води, що набігає.

Структура системи стабілізації диференту наведена на рис. 3.9.

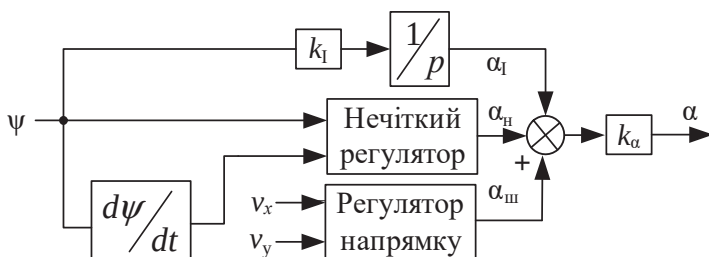


Рисунок 3.9 – Структура системи стабілізації диференту

Система стабілізації диференту забезпечує:

- поворот рулів зустрічно потоку води, який набігає;
- швидку стабілізацію диферента методами нечіткої логіки;
- усунення похибки стабілізації, яка викликана наявністю нечіткого нуля.

Для усунення статичної похибки до системи стабілізації диферента (ССД) встановлюється додатковий інтегральний контур, коефіцієнт k_I якого визначається емпіричним шляхом.

Формування моменту обертання АНПА, який забезпечує швидку стабілізацію диферента, забезпечено нечітким ПД-регулятором. Функції належності нечіткого регулятора представлені на рис. 3.10.

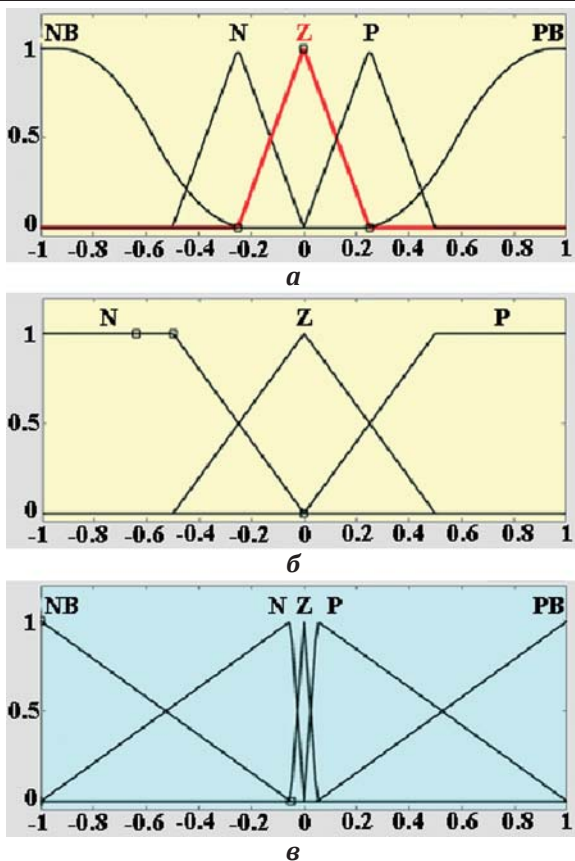


Рисунок 3.10 – Функції належності нечіткого регулятора системи
стабілізації диференту: *a* – вхідний терм диферента ψ ;
б – вхідний терм похідної диферента $d\psi/dt$; *в* – вихідний терм α_n

База правил нечіткого ПД-регулятора представлена в вигляді табл. 3.3.

Поверхня нечіткого виведення регулятора ССД для відповідних функцій належності та бази правил представлена на рис. 3.11.

Таблиця 3.3 – База правил нечіткого регулятора ССД

Ψ $d\Psi/dt$	NB	N	Z	P	PB
N	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
P	P	Z	N	NB	NB

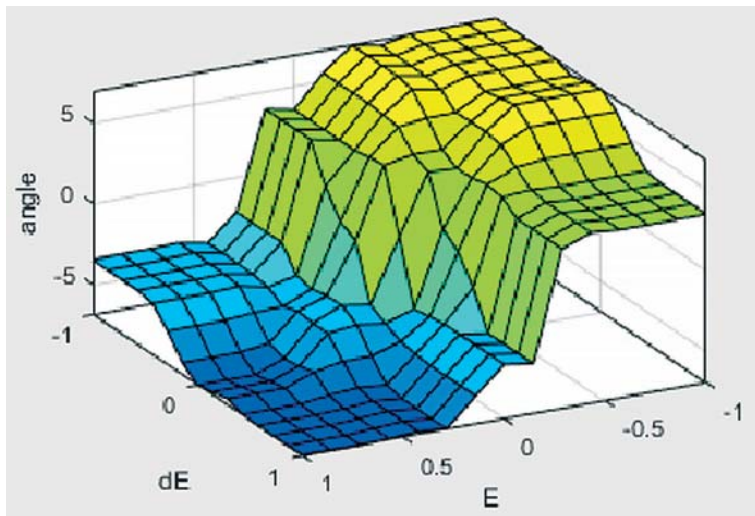


Рисунок 3.11 – Поверхня нечіткого виведення регулятору системи стабілізації диференту

Для встановлення руля зустрічно потоку води, що набігає, ($\alpha_{ш}$) розроблено блок «Регулятор напрямку», який реалізує залежність:

$$\alpha_{ш} = \begin{cases} 0, & \text{при } v_y \neq 0 \text{ і } v_x \neq 0; \\ -\arctg \frac{v_y}{v_x}, & \text{при } v_y \neq 0 \text{ або } v_x \neq 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

В залежності від напрямку маршового руху АНПА-РБ встановлюється коефіцієнт коригування k_α який визначається за формулою:

$$k_\alpha = \begin{cases} 1, & \text{при } v_x = 0; \\ \frac{v_x}{|v_x|}, & \text{при } v_x \neq 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Реалізація регулятора на базі MatLab Simulink представлена на рис. 3.12.

Значення кута диферента АНПА визначається з матриці положення Pb за допомогою блоку *Selector2* та переводиться в градуси підсиленням в $Kp2$ разів.

З матриці швидкостей руху АНПА у зв'язаній системі координат Vg_a за допомогою блоків *Selector3* та *Selector4* виділяються маршова (v_x) та вертикальна (v_y) складові.

Блок *direction regulator* реалізує рівняння (2.7), а блок Ka – (2.8).

Моделювання роботи ССД виконано спільно з роботою САК КЛ.

Показники якості роботи ССД зведено до табл. 3.4.

Перехідні процеси моделювання представлено на рис. 3.13.

Результати моделювання ССД показують її високу ефективність і можливість роботи в трьох режимах руху підводного апарату. При цьому максимальне відхилення положення АНПА від горизонтальної площини не перевищує 3 градуси.

Таким чином, помилка направленості дії рушіїв підводного апарата не перевищує 5,2%, що є цілком припустимим з позицій його практичного застосування. Таке відхилення при вертикальному русі обумовлене затримкою встановлення сервоприводом заданого положення.

Очевидно, що подальше зменшення отриманої помилки можливе за рахунок укомплектування електроприводів підводного апарата виконавчими механізмами підвищеної швидкодії. У першу чергу це стосується сервоприводів, які вносять найбільшу затримку при відпрацювання сигналів керування.

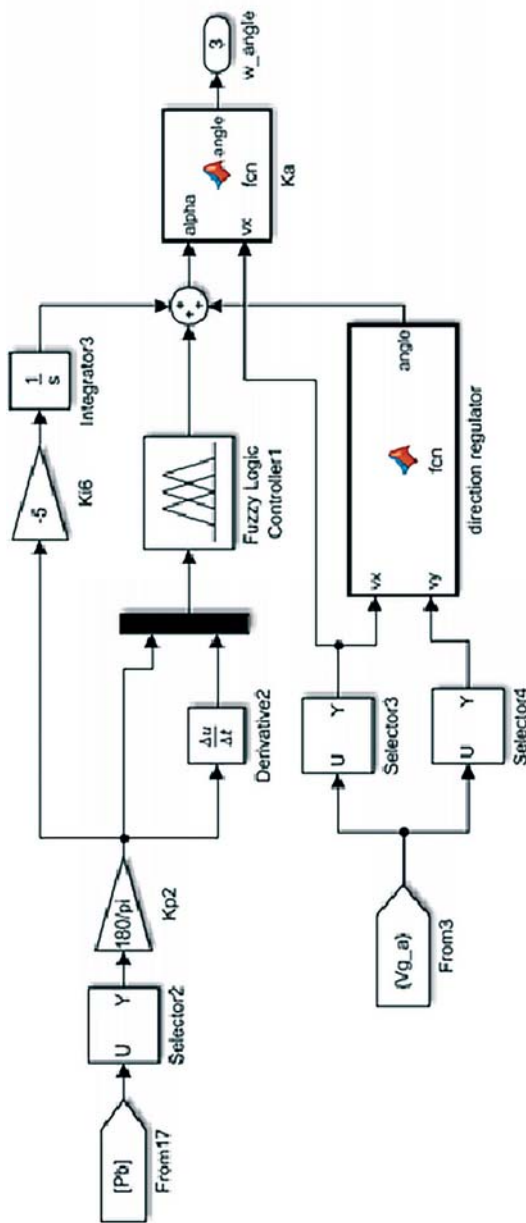
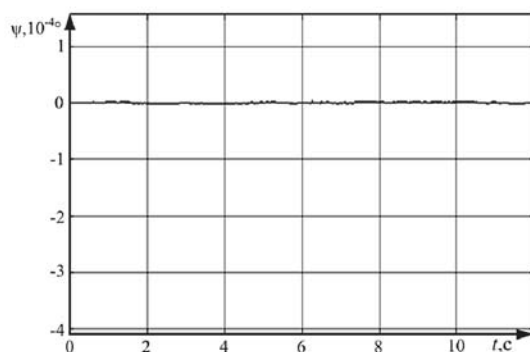


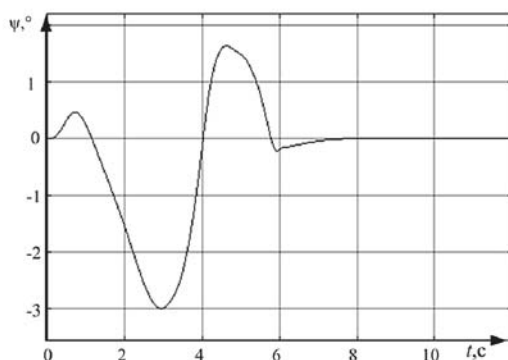
Рисунок 3.12 – Реалізація системи стабілізації диференту

Таблиця 3.4 – Показники якості системи стабілізації диференту

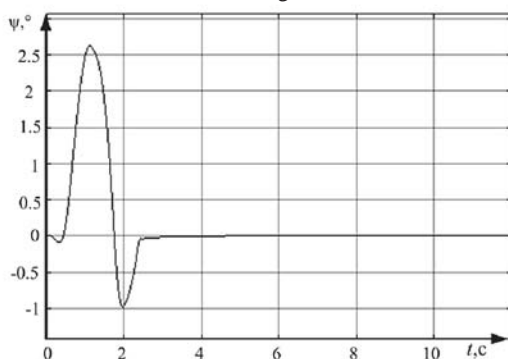
№ з/п	Показник	Маршовий	Вертикальний	Спільний
1	Початкове відхилення руля від напрямку потоку, град	0	90	40
2	Час перехідного процесу, с	0	8	5
3	Максимальне відхилення, град	$6 \cdot 10^{-6}$	3	2,62



a



б



в

Рисунок 3.13 – Перехідні процеси роботи СД:
а – маршовий рух; б – вертикальний рух; в – спільний рух

3.4 Синтез системи автоматичного керування плоским вертикальним рухом АНПА-РБ

Режим руху АНПА-РБ зі зміною глибини занурення є одним з основних режимів при виконанні підводних місій на акваторіях, які мають різні глибини. Необхідність такого режиму обумовлена вимогами деяких типів корисного навантаження АНПА, наприклад, вимогою руху зі стабілізацією висоти підводного апарату на ґрунті.

При цьому задачею САК плоским вертикальним рухом (ПВР) є стабілізація курсу, маршової та вертикальної швидкості АНПА-РБ.

Отже, виникає необхідність синтезу відповідних регуляторів та блоку розподілення потужності для узгодження сигналів керування між задачами повздовжнього руху підводного апарату та його повороту.

Система автоматичного керування ПВР (рис. 3.14) складається з регуляторів стабілізації швидкості маршового (МШ) та вертикального (ВШ) руху, регулятора курсу (РК) та блоку розподілення потужності (РП).

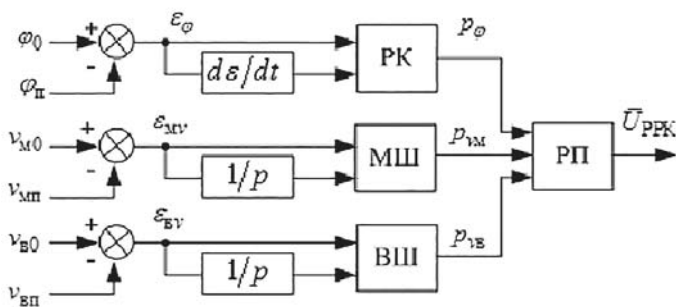


Рисунок 3.14 – Структура блоку САК ПВР

Для забезпечення стабілізації поступальної швидкості (МШ та ВШ) використовується ПІ регулятор на основі нечіткої логіки [69]. Його функції належності представлені на рис. 3.15.

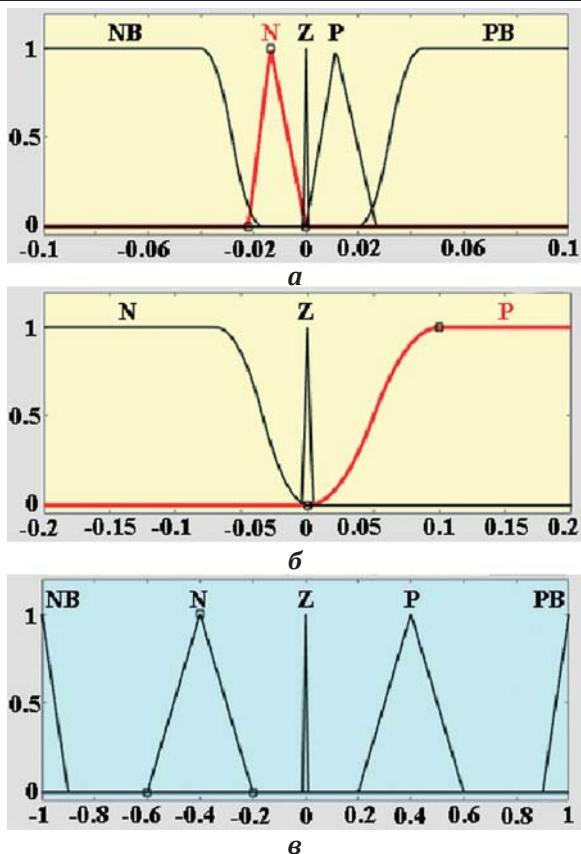


Рисунок 3.15 – Функції належності нечітких регуляторів МШ та ВШ:

a – похибки ϵ_{MV} та ϵ_{BV} ; $б$ – інтеграл похибок ϵ_{MV} та ϵ_{BV} ;

$в$ – вихідний сигнал p_{MV} та p_{BV}

База правил регуляторів представлена в табл. 3.5.

Поверхня нечіткого виведення представлена на рис. 3.16.

База правил регулятора курсу підводного апарату представлена в табл. 3.6.

Для стабілізації курсу використовується нечіткий ПД-регулятор (рис. 3.17).

Таблиця 3.5 – База правил нечітких регуляторів маршової та вертикальної швидкості

$i\varepsilon_v$ \ ε_v	NB	N	Z	P	PB
N	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
P	P	Z	N	NB	NB

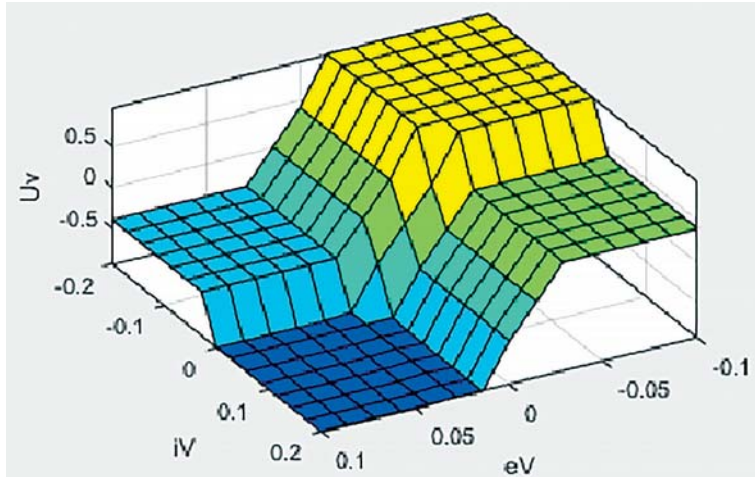


Рисунок 3.16 – Поверхня нечіткого виведення регуляторів маршової та вертикальної швидкості

Таблиця 3.6 – База правил нечіткого регулятора курсу

$d\varepsilon_\varphi$ \ ε_φ	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	PS	P	NB
N	PB	PS	P	Z	NB
Z	PB	P	Z	N	NB
P	PB	Z	N	NS	NB
PB	PB	N	NS	NB	NB

Поверхня нечіткого виведення регулятора курсу зображена на рис. 3.18.

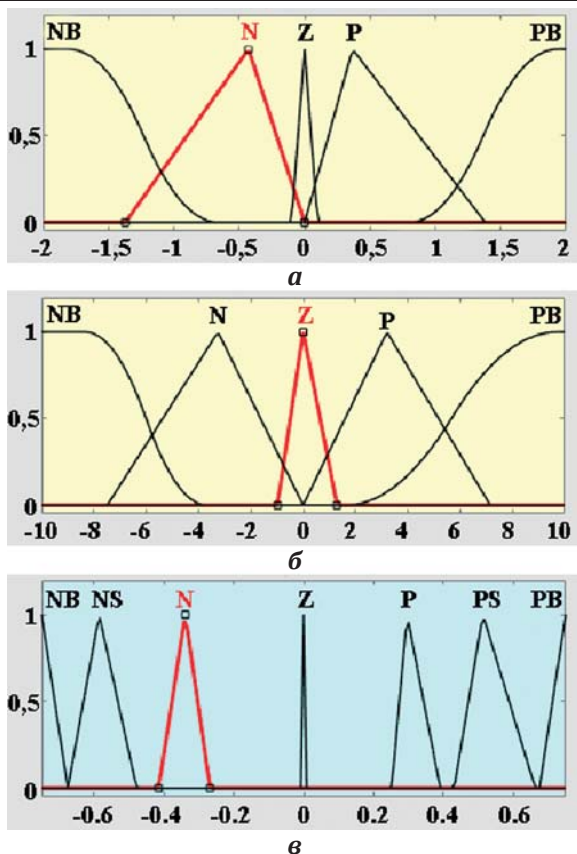


Рисунок 3.17 – Функції належності нечіткого регулятора курсу:
a – похибка ε_ϕ ; *б* – диференціал похибки $d\varepsilon_\phi/dt$; *в* – вихідний сигнал p_ϕ

Блок РП (див. рис. 3.14) розподіляє сигнал керування між рушійними пристроями АНПА. Сигнал керування вертикальним двигуном (p_{vb}) передається без змін, а однонаправлений сигнал керування маршовими двигунами (p_{vm}) та різнонаправлений (p_ϕ) необхідно коригувати, якщо їх сума більша за максимально допустиме значення сигналу керування.

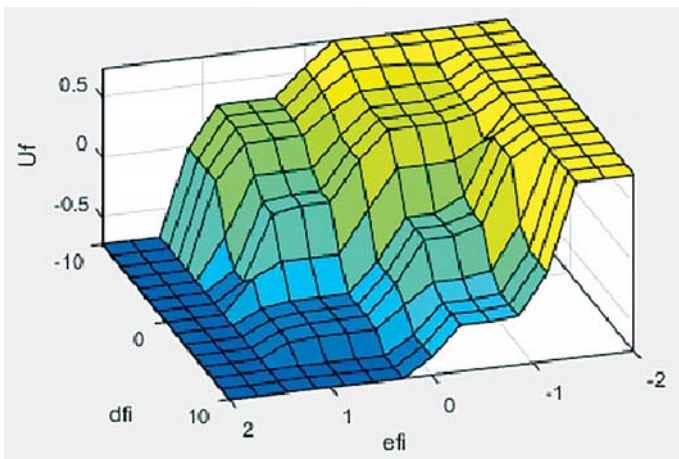


Рисунок 3.18 – Поверхня нечіткого виведення РК

Перш за все, при розподіленні напруги на маршові двигуни пріоритетнішою є стабілізація курсу.

Таким чином, вихідний вектор керування після обробки в РП буде мати вид:

$$\vec{U}_{PKK} = U_{\max} \begin{cases} \begin{bmatrix} p_{VM} - p_{\phi} & p_{VM} + p_{\phi} & p_{VB} \end{bmatrix} \\ \text{при } |p_{VM}| + |p_{\phi}| \leq 1; \\ \begin{bmatrix} \frac{p_{VM}}{|p_{VM}|}(1 - |p_{\phi}|) - p_{\phi} & \frac{p_{VM}}{|p_{VM}|}(1 - |p_{\phi}|) + p_{\phi} & p_{VB} \end{bmatrix} \\ \text{при } |p_{VM}| + |p_{\phi}| > 1, \end{cases} \quad (2.9)$$

де $U_{\max}$ – номінальна напруга двигунів.

Реалізація САК ПВР в програмному середовищі MatLab Simulink представлена на рис. 3.19.

Вхідними даними для роботи системи є:

- ϕ_{z_grad} – заданий курс в градусах;
- Pb – матриця положення АНПА, за допомогою *Selector11* обирається поточний курс в радіанах (2 рядок 2 стовпчик), потім за допомогою *Kp3* переводиться в градуси;

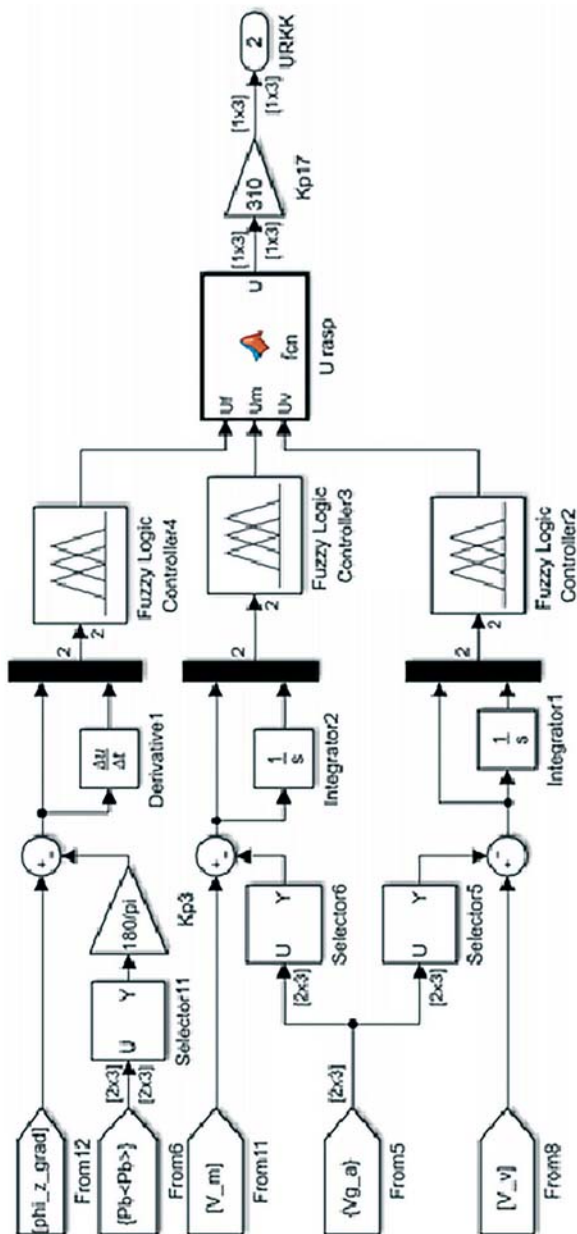


Рисунок 3.19 – Реалізація БКШ в середовищі *MatLab Simulink*

- V_m та V_v – задана маршова та вертикальна швидкість відповідно;
- Vg_a – матриця швидкостей АНПА в ЗСК, за допомогою *Selector6* та *Selector5* обираються, відповідно, поточна маршова (1 рядок 1 стовпчик) та вертикальна швидкість (1 рядок 2 стовпчик).

Блок *U rasp* реалізує вираз (2.9), а Kp_{17} приймається рівним номінальній напрузі ЕРП, оскільки вихідним сигналом регулятора є масив сигналу керування РКК в відносних одиницях.

Регулятор стабілізації швидкості працює для встановлення як вертикальної, так і маршової швидкості АНПА–РБ, оскільки вихідною величиною регулятора є напруга в відносних одиницях. Перехідні процеси роботи регулятора вертикальної швидкості представлено на рис. 3.20.

Для стабілізації швидкості маршового руху застосовано регулятор, ідентичний такому для МШ. Оскільки вихідна величина задається у відносних одиницях, переналаштовування регулятор не потребує.

Результати його моделювання представлено на рис. 3.21.

Основні показники якості перехідних процесів стабілізації швидкості зведено до табл. 3.7.

Перевіримо якість роботи РК в режимі одномірного поворотного руху при сталому та змінному вхідних сигналах (рис. 3.22).

Відповідні сигнали керування маршовими електроприводами представлено в відносних одиницях на рис. 3.23.

Перехідні процеси регулятора курсу підтверджують високу його швидкодію, а перерегулювання не перевищує $3,5^\circ$.

Запізнювання при динамічному режимі роботи є несуттєвим і складає 0,15 с.

Основні показники якості регулятора курсу зведено до табл. 3.8.

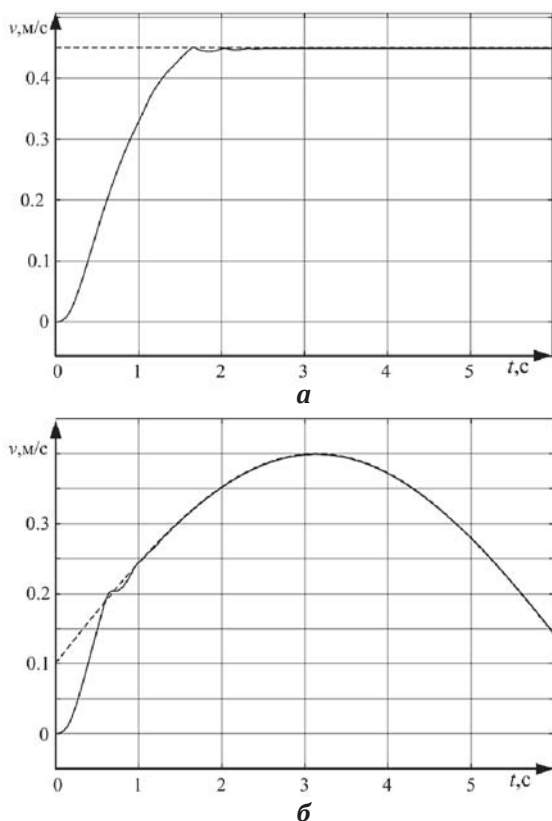


Рисунок 3.20 – Перехідні процеси стабілізації вертикальної швидкості:
 - - - - - задане значення; ——— діюче значення;
 а – $v = \text{const}$; б – $v = \text{var}$

Ефективність роботи САК ПВР необхідно проводити при одночасній роботі всіх регуляторів, оскільки регулятор маршового руху та курсу використовують однакові виконавчі механізми.

Динаміка руху АПНА РБ показує, що рух по одним координатам впливає на рух в інших.

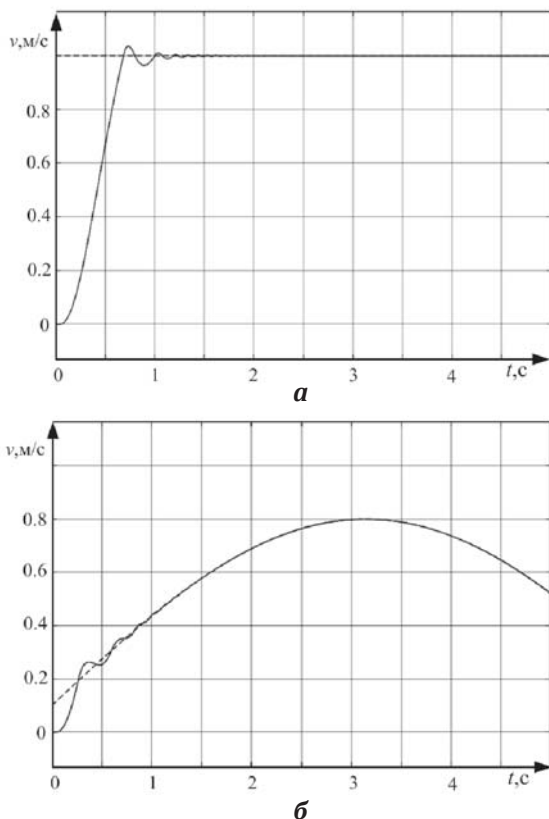


Рисунок 3.21 – Перехідні процеси стабілізації маршової швидкості:
 ----- задане значення; ———— діюче значення;
 а – $v = \text{const}$; б – $v = \text{var}$

Таблиця 3.7 – Показники якості роботи регуляторів маршової та вертикальної швидкості

№ з/п	Показник	Вертикальний		Маршовий	
		const	var	const	var
1	Початкове відхилення, м/с	0,45	0,1	1	0,2
2	Час перехідного процесу, с	2,5	1,5	1,5	1,2
3	Перерегулювання, %	0	5	3.8	7

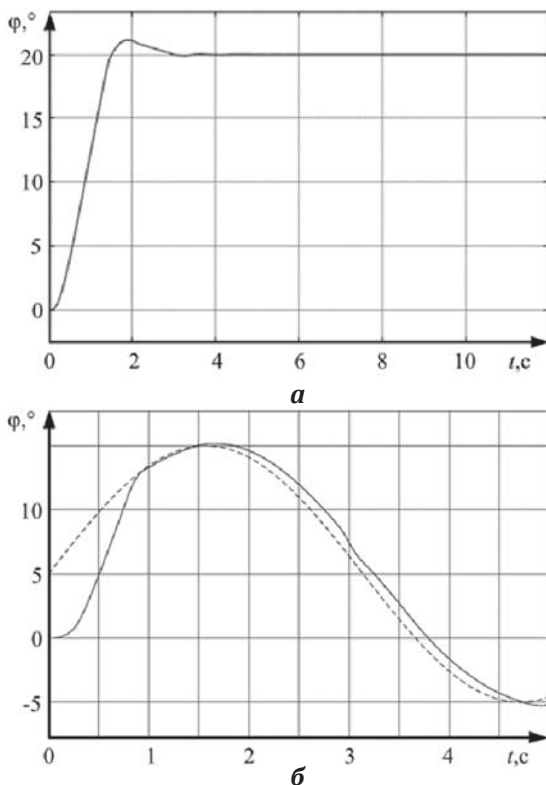


Рисунок 3.22 – Перехідні процеси стабілізації курсу:
----- задане значення; ——— діюче значення;
 $\alpha - \varphi_0 = \text{const}$; $\beta - \varphi_0 = \text{var}$

Сигнали керування для електроприводу в заданому режимі роботи наведено на рис. 3.24.

Показники якості САК ПВР зведено до табл. 3.9.

Процеси керування САК підводного апарату в режимі плоского вертикального руху з поворотом при одночасній роботі всіх її регуляторів представлено на рис. 3.25.

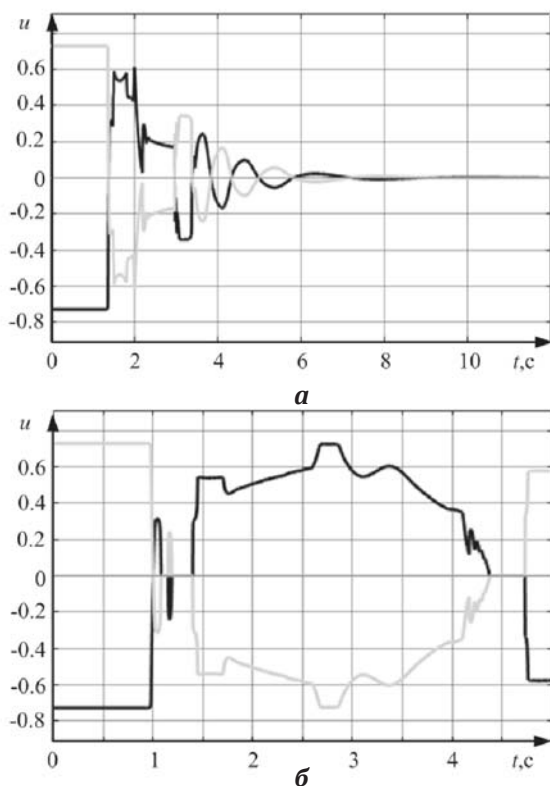


Рисунок 3.23 – Сигнали керування маршовими двигунами в відносних одиницях: ——— – лівий; ——— – правий;
 $a - \varphi_0 = \text{const}$; $b - \varphi_0 = \text{var}$

Таблиця 3.8 – Показники якості роботи регулятора курсу

№ з/п	Показник	const	var
1	Початкове відхилення, град	20	5
2	Час перехідного процесу, с	1,75	0,75
3	Перерегулювання,	3,5°	0
4	Запізнювання, с	–	0,15

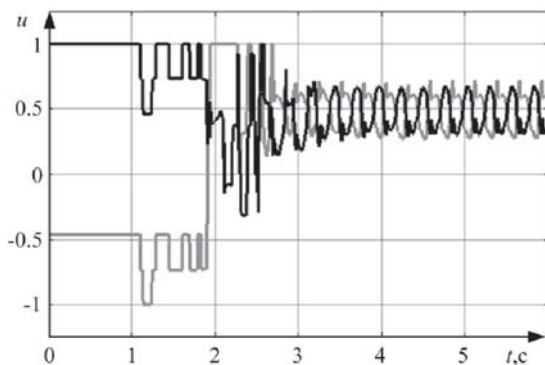


Рисунок 3.24 – Сигнали керування маршовими двигунами
в відносних одиницях: — – лівий; - - - - - правий

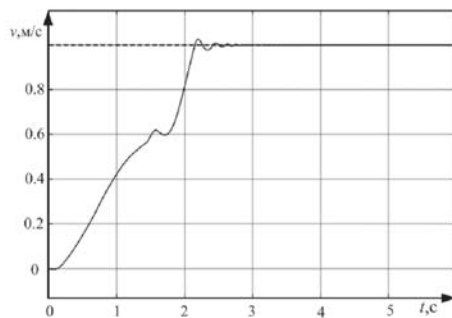
Таблиця 3.9 – Показники якості при спільній роботі

№ з/п	Показник	МШ	ВШ	РК
1	Початкове відхилення	1 м/с	-0,45 м/с	20 град
2	Час перехідного процесу, с	3	3,5	2,2
3	Перерегулювання, %	2,5	6	3

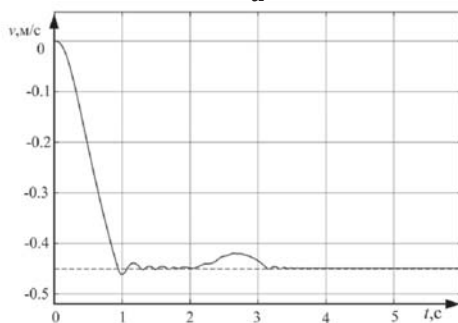
При спільній роботі регуляторів показники якості змінилися несуттєво. Збільшення часу перехідного процесу стабілізації маршової швидкості обумовлено пріоритетною задачею стабілізації курсу, а збільшення часу перехідного процесу стабілізації вертикальної швидкості – наявністю обертової швидкості разом з маршовою, що впливає на прискорення по вертикальній осі апарата [60].

Розроблена САК має високу швидкодію (тривалість перехідного процесу не перевищує 3,5 с), що справедливо навіть при одночасній роботі усіх регуляторів.

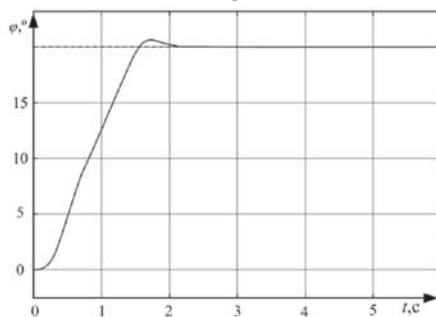
Наявність статичної похибки керування швидкістю поступального руху обумовлена нечітким нулем регуляторів. Дана статична похибка є невеликою, тому нею можна знехтувати.



а



б



в

Рисунок 3.25 – Перехідні процеси роботи системи автоматичного керування рухом АНПА-РБ:

----- – задане значення; ——— – діюче значення;

а – регулятор маршової швидкості;

б – регулятор вертикальної швидкості; в – регулятор курсу

3.5 Експериментальне дослідження регулятора курсу підводного апарату

Постановка натурних експериментів і обробка їх результатів дуже часто бувають складними в реалізації, тому розробляються методики і обладнання, які дають змогу проводити дослідження в умовах, близьких до натурних.

Натурний експеримент проводився відповідно до розробленої «Програми і методики морського натурного експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм», яка була розроблена у Науково-дослідному інституті підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (додаток А).

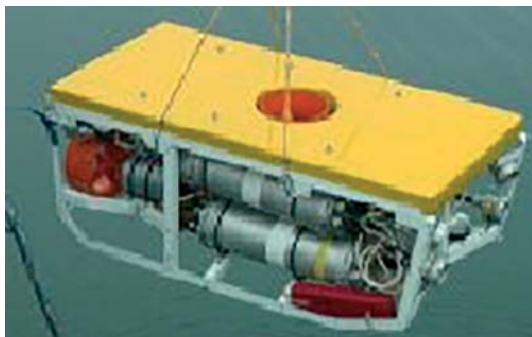


Рисунок 3.26 – Зовнішній вигляд прив'язного підводного апарату проекту Гідрограф»

Як дослідний макет АНПА було використано прив'язний підводний апарат проекту «Гідрограф» (рис. 3.26), який має структуру РКК, що забезпечує можливість імітувати АНПА-РБ, а наявність кабель-тросу імітує зовнішні збурення від кабель-буксиру РБ.

ППА проекту «Гідрограф» має наступні технічні характеристики:

максимальна робоча глибина.....	250 м
габаритні розміри.....	122×600×540 мм
маршова швидкість.....	2 вузла
максимальна довжина кабель-тросу.....	до 400 м
вага апарата.....	97 кг
електроживлення	220В, 50 Гц, 2 кВт

Однією з особливостей натурального експерименту є те, що сенсори зворотного зв'язку мають обмежену точність вимірювання, а також можуть вносити свої похибки в систему керування.

Так, при визначенні курсу за допомогою магнітометра та акселерометра виникає велика похибка при наближенні підводного апарата до металевих конструкцій.

При використанні гіроскопа в якості датчика курсу виникає технічна проблема – у стані спокою його вимірювання мають незначний зсув, який спричинює появу похибки інтегрування, яка поступово збільшується.

Для усунення вказаних недоліків використовується фільтр Маджвіка [70]. В якості інструменту використовуються кватерніони [71], які дають змогу використовувати дані акселерометра і магнітометра для аналітичних обчислень і оптимізації методом градієнтного спуску для отримання похибки вимірювань гіроскопа у вигляді похідної від кватерніона.

Для визначення похідної цифрового сигналу використовується багатоточковий метод, що дозволяє усунути різкі перепади та підвищити достовірність отриманих результатів.

Для дослідження якості регулятора курсу (рис. 3.27) в якості зворотного зв'язку використано вимірювання трьох датчиків: акселерометра $S_{\hat{a}t}$, магнітометра $S_{\hat{m}t}$ та гіроскопа $S_{\omega t}$.

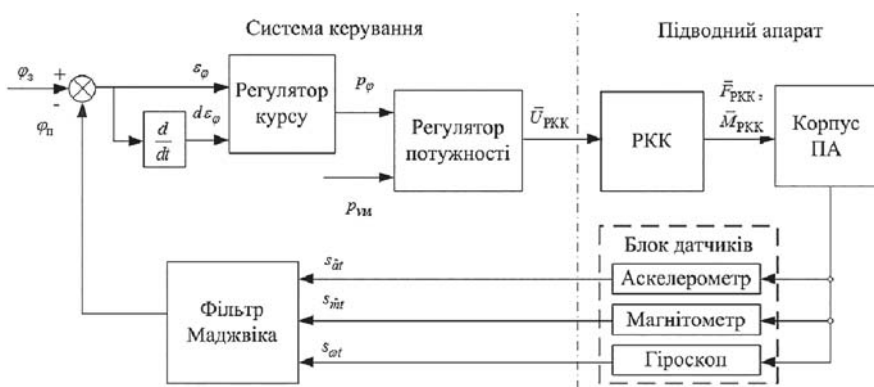


Рисунок 3.27 – Структура системи дослідження ефективності регулятора курсу

В якості блоку датчиків використано MPU9250. Даний модуль включає в себе трьохосьовий акселерометр, трьохосьовий магнітометр та трьохосьовий гіроскоп, що виконані на одній мікросхемі [72].

Такий підхід виключає можливість не співвісної установки даних сенсорів на підводному апараті.

Для маршового руху використовується незмінний сигнал керування, що забезпечує однонаправлений упор маршових рушіїв p_{vm} , а сигнал різниці упорів маршових рушіїв p_ϕ задається регулятором курсу. Дані сигнали передаються у відносних одиницях. У натурному експерименті сигнал p_{vm} становив 0,5.

Система керування апаратом розміщена на пості керування, реалізована в програмному середовищі *Matlab Simulink* та може функціонувати в одному з двох режимів: ручне керування з формуванням пакету даних та обробка отриманої інформації з автоматичним керуванням. Структуру системи керування зображено на рис. 3.28.

Для керування в ручному режимі використовується «геймпад» серійного виробництва з підключенням типу USB. Це дає змогу використання стандартних блоків бібліотеки *Simulink* (*Analog Input* та *Digital Input*) для роботи з ним та об'єднання їх в блок *GamePad IO*. Блоки *Sticks* та *MC Vector Generator* відповідають за обробку сигналів від гребків «геймпаду» та формування сигналу керування приводами дослідного макету АНПА-РБ.

Цифрові сигнали керування відповідають за керування світильниками та переходу до автоматичного режиму. Блок *LED Brightnesses Generator* формує байт даних, що передається в структуру пакету на відправлення.

Блок *MC Vector Selector* відповідає за обрання вектору керування (автоматичне або ручне). Блок *Motor On/Off Generator* з обраного сигналу керування формує байт пакету стану для рушія, що включає в себе команди запуску та завдання напрямку для кожного ЕРП, а *Motor Frequencies Generator* – сигнали потужності електроприводів, шляхом завдання частот їх живлення.

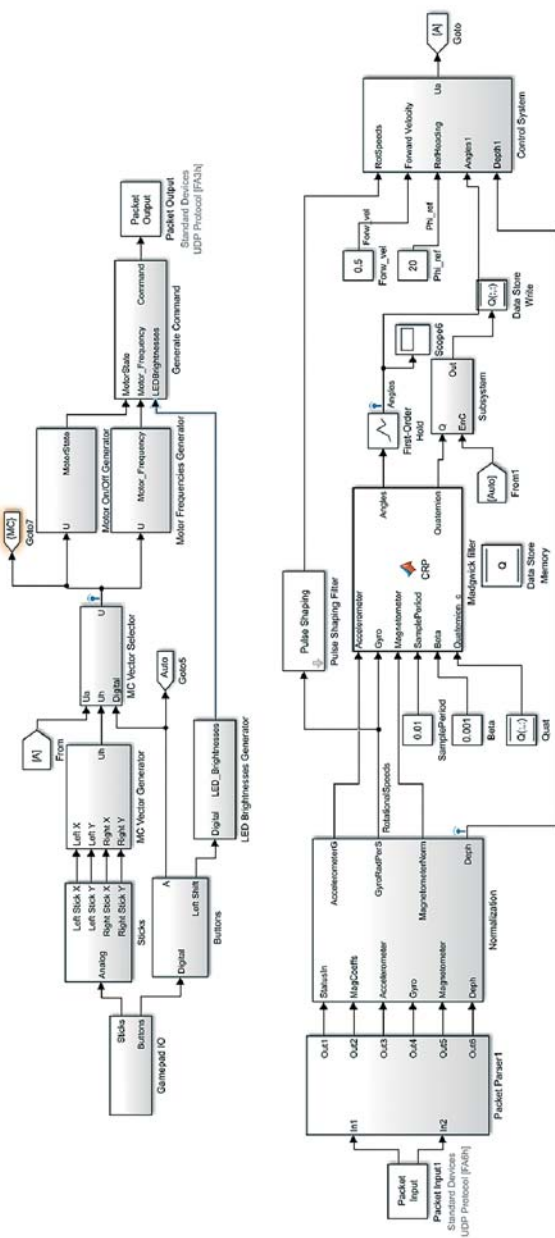


Рисунок 3.28 – Реалізація системи керування дослідним макетом

Блок *Generate Command* формує пакет сигналу керування, який надходить до дослідного макету АНПА-РБ за допомогою стандартного блоку *Packet Output*, налаштованого на передачу сигналу за протоколом UDP.

Отримання інформації забезпечує блок *Packet Input1*, налаштованого на отримання інформації за допомогою протоколу UDP. Блок *Packet Parser1* обирає з отриманого пакету даних необхідні параметри та надсилає їх до блоку *Normalization*, який приводить їх до фізичних величин.

Фільтр Маджвіка (блок *Madgwick filter*) об'єднує інформацію від датчиків курсового положення та передає її системі автоматичного керування, додаткові параметри фільтра задаються блоками *SamplePeriod* та *Beta*. При переході до автоматичного режиму блок *Subsystem* скидає налаштування фільтру Маджвіка.

В блоці *Control System* знаходиться безпосередньо сам досліджуваний регулятор (рис. 3.29). А блок *Filter* реалізує метод, представлений в [73].

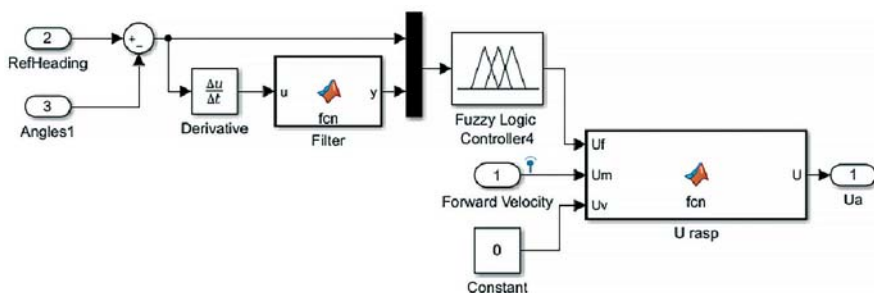


Рисунок 3.29 – Реалізація блоку *Control System*

Робота САК вважається такою, що задовольняє вимогам технічного завдання, якщо виконується наступна умова:

$$J = (|\bar{\sigma}| + \sigma_{\tau} \leq \sigma_{\max}) \wedge (\bar{\tau} + \varepsilon_{\tau} \leq \tau_{\max});$$

$$\sigma_{\max} = 10\%; \tau_{\max} = 5 \text{ с},$$

де $\sigma_{\max}$ – максимально допустиме значення перерегулювання,
 $\tau_{\max}$ – максимально допустима тривалість перехідного процесу.

Для перевірки якості роботи регулятора курсу отримано перехідний процес стабілізації курсу (рис. 3.30).

Згідно з нормативним документом «Програма і методика морського натурного експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного не-населеного підводного апарату з радіобуєм» (додаток А) результати

випробувань зведено до табл. 3.10. В ході натурного експерименту було доведено працездатність регулятора курсу.

Показники якості та форма перехідного процесу несуттєво відрізняються від тих, що були отримані при математичному моделюванні системи.

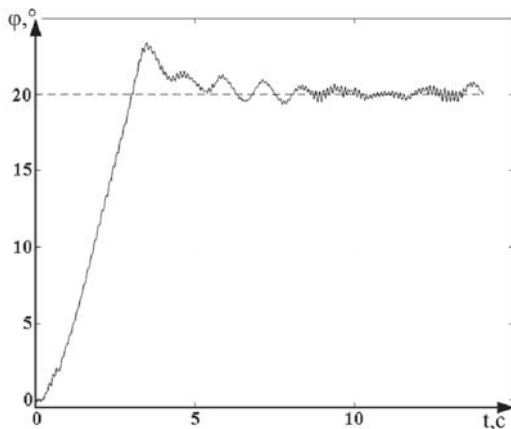


Рисунок 3.30 – Перехідний процес стабілізації курсу:
----- – задане значення;
——— – діюче значення

Таблиця 3.10 – Результати морського натурного експерименту

Показник якості	Експериментальне значення		Максимально допустиме значення	
	Абсолютне	Відносне, %	Абсолютне	Відносне, %
$\bar{\sigma}$	3,53	0,99	–	–
ε_{σ}	0,34	0,09	–	–
$\bar{\sigma} + \varepsilon_{\sigma}$	3,87	1,08	7,0	2,0
$\bar{\tau}$	2,0	–	–	–
ε_{τ}	0,4	–	–	–
$\bar{\tau} + \varepsilon_{\tau}$	2,4	–	4,0	–

Розділ 4

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРІВ ТАКТИЧНОГО РІВНЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ

4.1 Синтез системи автоматичного позиціонування підводного апарата в робочій точці

Позиціонування у точці є одним з основних режимів роботи АНПА–РБ. Він має місце при обстеженні та документуванні виявлених точкових об'єктів (малорозмірних предметів, розташованих на морському дні та у водній товщі), а також при оперативній передачі інформації про них у реальному часі.

Оскільки структура рушійно-кермового комплексу АНПА–РБ не передбачає наявності рушіїв, які б забезпечували його лаговий рух, керування рухом апарата доцільно розглядати не в прямокутній системі координат, а в циліндричній [60]. В даній системі координат вихідними величинами є висота над точкою, відстань в горизонтальній площині та кут повороту відносно головної осі.

Таким чином, АНПА–РБ, який має два маршових рушії та один вертикальний рушій, буде трактувати їх як: глибина занурення, курс до цілі та відстань, пройдена маршовим рухом.

Систему позиціонування АНПА–РБ у робочій точці (СПРТ) пропонується організувати за структурою на рис. 4.1, а саме – розподілити стабілізацію вертикальної та горизонтальної складових [74].

Стабілізація глибини виконується керуванням швидкістю занурення АНПА–РБ.

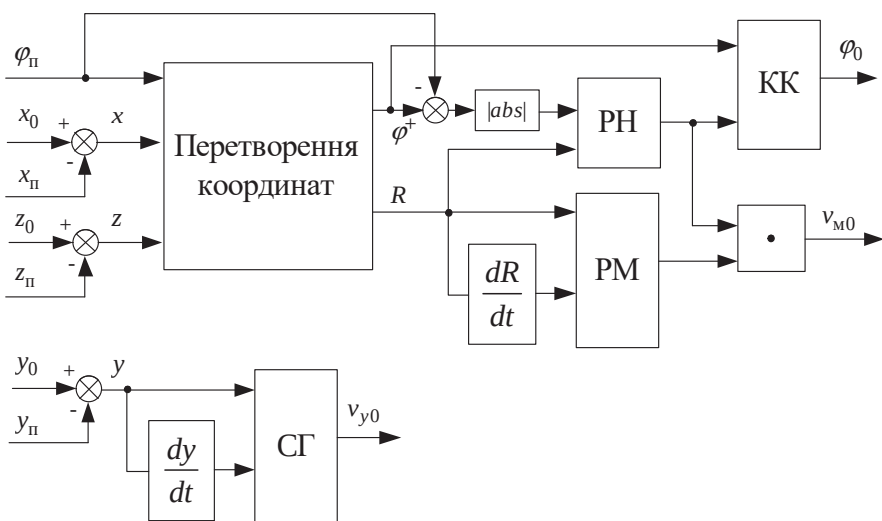


Рисунок 4.1 – Структура СПРТ

В якості стабілізатора глибини (СГ) виступає нечіткий ПД-регулятор. Його функції належності зображені на рис. 4.2.

База правил СГ представлена в табл. 4.1.

Залежність вхідних та вихідного сигналів СГ представлена нечіткою поверхнею, яку зображено на рис. 4.3.

Перехідний процес стабілізації глибини представлено на рисунку 4.4.

Значно складнішою задачею СПРТ є керування горизонтальним рухом, оскільки він вимагає стабілізації двох вихідних координат: курсу та швидкості маршового руху.

Для стабілізації горизонтальних координат необхідно визначити курс та відстань до цілі. Для цього координати точок необхідно виразити в полярній системі координат.

Для переходу від прямокутної напівзв'язаної системи координат, яка відповідає правій трійці векторів, в полярну необхідно провести наступні перетворення:

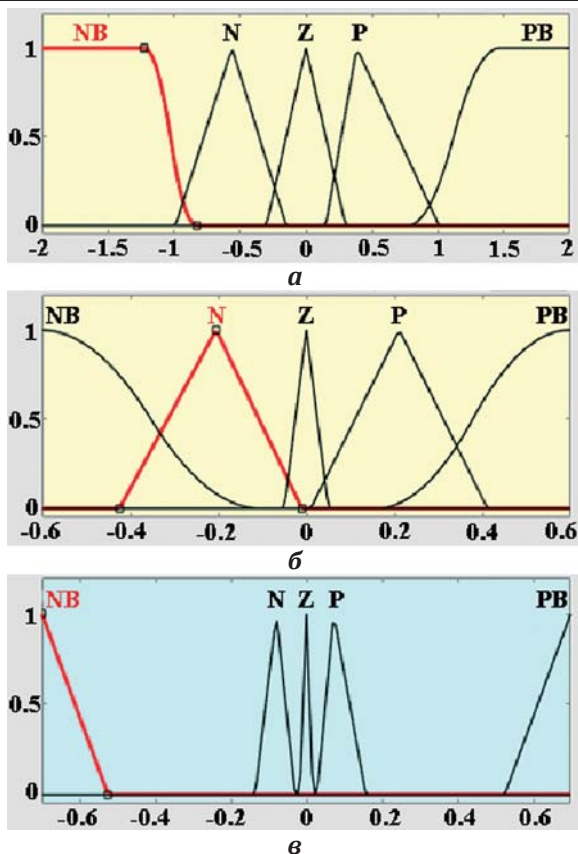


Рисунок 4.2 – Функції належності нечіткого стабілізатора глибини:
a – похибка; *б* – диференціал похибки; *в* – вихідний сигнал

Таблиця 4.1 – База правил СГ

$dy \backslash y$	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	P	P	NB
N	PB	P	P	Z	NB
Z	PB	P	Z	N	NB
P	PB	Z	N	N	NB
PB	PB	N	N	NB	NB

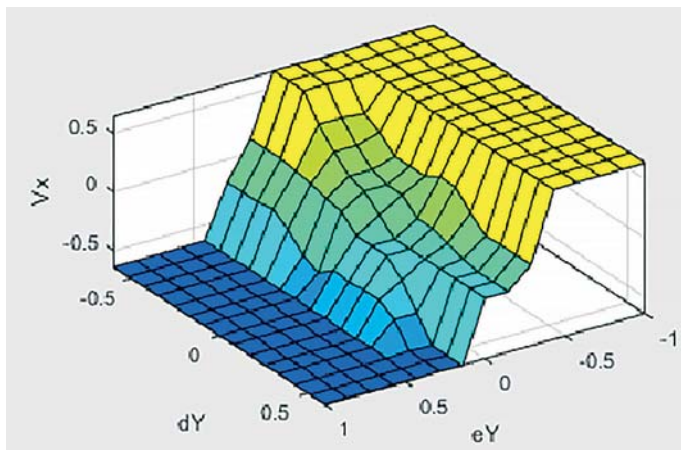


Рисунок 4.3 – Поверхня нечіткого виведення СГ

$$R = \sqrt{x^2 + z^2};$$

$$\varphi = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{-z}{x}\right), & x > 0; \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{-z}{x}\right) + \pi, & x < 0, z \geq 0; \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{-z}{x}\right) - \pi, & x < 0, z < 0; \\ \frac{\pi}{2}, & x = 0, z > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & x = 0, z < 0; \\ \varphi_{\Pi}, & x \approx 0, z \approx 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

де x, y, z – координати заданої точки відносно ПА в ПСК; R – відстань від апарата до заданої точки; φ – напрямок курсу апарата до заданої точки.

Оскільки АНПА-РБ забезпечує повздовжній рух як в прямому, так і в зворотному напрямку, то якщо ціль лежить позаду на невеликій відстані, до неї раціональніше дістатись заднім ходом.

Для цього використано регулятор напрямку (РН).

Оскільки неможливо точно визначити, при яких відхиленнях курсу необхідно приймати рішення щодо переходу до режиму заднього ходу, використано нечіткий регулятор (рис. 4.5), оскільки він може оперувати нечіткими поняттями.

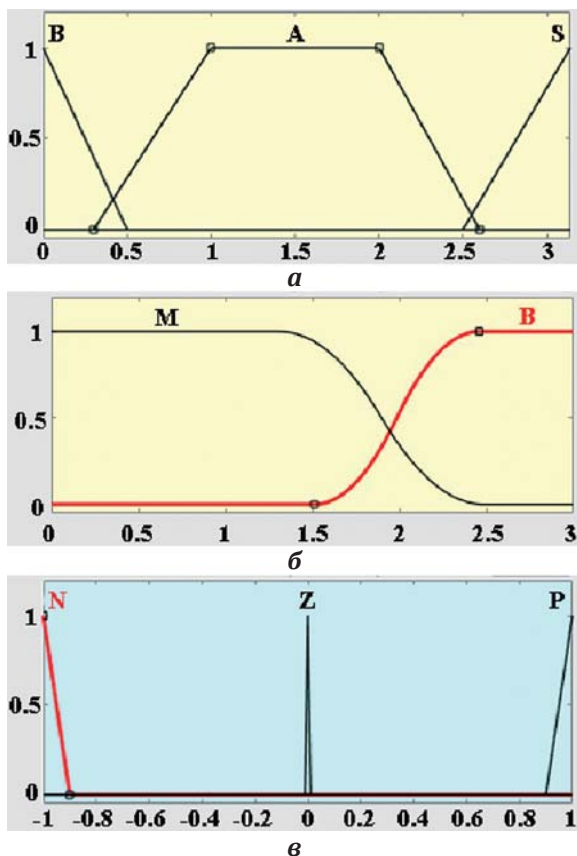


Рисунок 4.5 – Функції належності нечіткого регулятора напрямку:
а – похибка курсу; б – відстань до цілі; в – вихідний сигнал

Відповідно до завдання регулятор повинен показувати напрямок руху та коефіцієнт відповідності йому, який в подальшому використовується для масштабування вихідної швидкості, а для корекції курсу необхідно лише використання знаку.

База правил РН представлена в вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – База правил регулятора напрямку

$R \backslash d\phi $	B	A	S
M	P	Z	N
B	P	Z	Z

Поверхня нечіткого виведення для РН представлена на рис. 4.6.

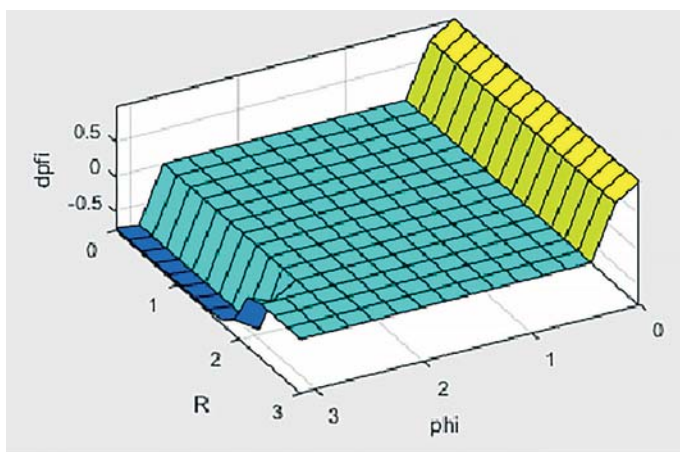


Рисунок 4.6 – Поверхня нечіткого виведення РН

Регулятор маршового руху (РМ) керує лише швидкістю, а напрямок коригується вихідним коефіцієнтом РН. Вихідною величиною РМ є швидкість маршового руху АНПА.

Функції належності РМ приймуть вигляд (рис. 4.7).

Базу правил для регулятора маршового руху зведено до табл. 4.3.

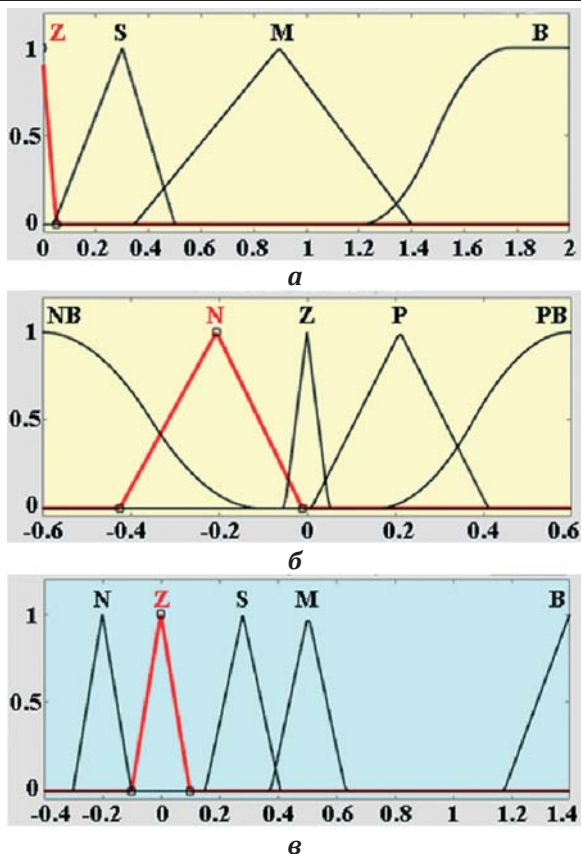


Рисунок 4.7 – Функції належності нечіткого регулятора
маршового руху: a – відстань до цілі;
 $б$ – швидкість наближення до цілі; $в$ – вихідний сигнал

Таблиця 4.3 – База правил регулятора маршового руху

dR \ R	Z	S	M	B
NB	N	N	Z	B
N	Z	Z	S	B
Z	Z	S	M	B
P	S	M	M	B
PB	M	M	B	B

Поверхня нечіткого виведення для РМ представлена на рис. 4.8.

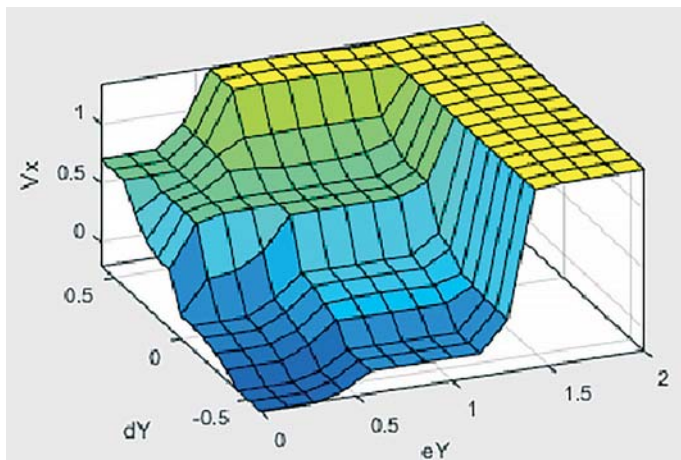


Рисунок 4.8 – Поверхня нечіткого виведення РМ

Корекція курсу після визначення напрямку руху відбувається за наступною формулою:

$$\varphi_0 = \begin{cases} \varphi, & k \geq 0; \\ \varphi + \pi, & k < 0, \varphi < 0; \\ \varphi - \pi, & k < 0, \varphi \geq 0, \end{cases} \quad (4.2)$$

де k – вихідний коефіцієнт регулятора напрямку.

Реалізація системи позиціонування АНПА-РБ у робочій точці в програмному середовищі *MatLab Simulink* представлена на рис. 4.9.

Вхідними даними для роботи системи є:

- Pb – матриця положення АНПА, за допомогою *Selector7* обирається поточний курс в радіанах (2 рядок 2 стовпчик);
- *Selector8* – координата X (1 рядок 1 стовпчик);
- *Selector9* – координата Z (1 рядок 3 стовпчик);
- *Selector10* – координата Y (1 рядок 2 стовпчик);
- X_z, Z_z, Y_z – задані координати для АНПА.

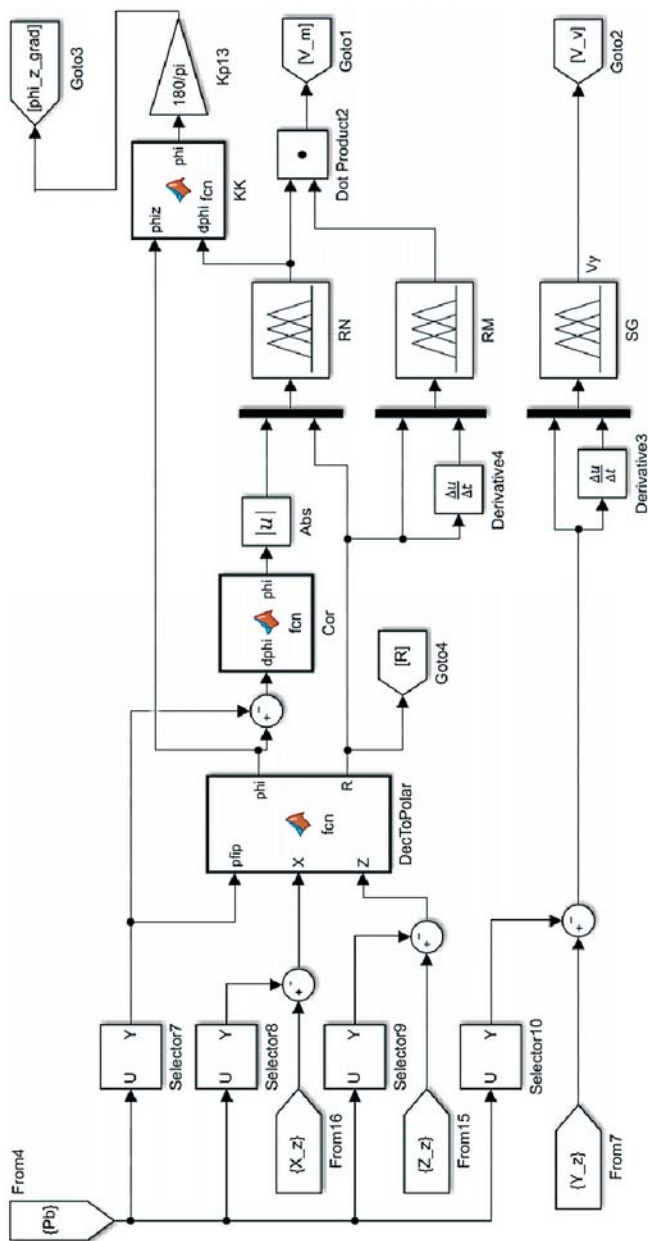


Рисунок 4.9 – Реалізація СПРТ в середовищі *MatLab Simulink*

Блок *DecToPolar* реалізує рівняння (4.1), а *KK* – (4.2).

Результат порівняння поточного курсу та курсу, на виході блоку *DecToPolar* може виходити за рамки діапазону $[-\pi; \pi]$. Дану особливість враховано блоком корекції *Cor*, який реалізує вираз:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi, & |\varphi| \leq 0; \\ \varphi + 2\pi, & \varphi < 0; \\ \varphi - 2\pi, & \varphi > 0. \end{cases}$$

Процес стабілізації АНПА-РБ на площині представлено на рис. 4.10.

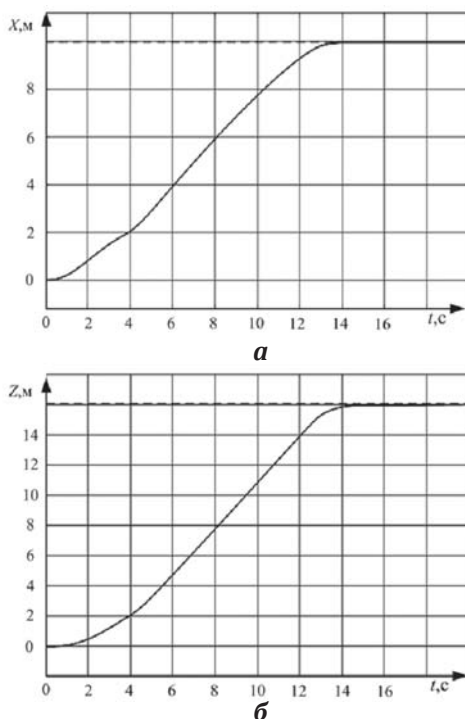


Рисунок 4.10 – Стабілізація АНПА-РБ на площині:
----- задане значення; ——— діюче значення;
а – координата X ; б – координата Z

Показники якості процесів стабілізації глибини та стабілізації на площині представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Показники якості системи стабілізації в точці

№ з/п	Показник	СГ	Стабілізація на площині
1	Початкове відхилення, м	2,8	18,8
2	Час перехідного процесу, с	7	14
3	Перерегулювання, %	відсутнє	відсутнє

Застосування СПРТ дає змогу задовольнити вимогам, які ставляться до САК АНПА–РБ для задач висвітлення підводної обстановки в природоохоронних цілях, наприклад при реалізації задач з виявлення та ідентифікації порушника природоохоронної акваторії.

4.2 Робота тактичного рівня системи автоматичного керування підводним апаратом у режимі траєкторного руху

Систему позиціонування в робочій точці можна застосувати для автоматизації траєкторного руху АНПА–РБ. При цьому траєкторія руху АНПА представляється масивом точок, які апарат повинен пройти.

Алгоритми розбиття траєкторії на масив заданих точок можна реалізувати одним з двох способів: розбиттям траєкторії на рівні відрізки, точки яких лежать на заданій траєкторії, або установкою контрольних точок на кінцях прямолінійних частин траєкторії.

Коли АНПА–РБ підходить на задану відстань e від установленної точки, ідентифікатор i збільшується на одиницю і апарат починає рух в напрямку наступної точки. В САК даний алгоритм реалізовано системою слідування місії (ССМ), яка змінює відповідний режим роботи начіпного обладнання.

Реалізація ССМ для режиму руху АНПА на площині в системі *Matlab Simulink* представлена на рис. 4.11.

Блок *GetTrajectory* завантажує з файлу задану траєкторію руху АНПА та в повному обсязі передає її до блоку *SetPoint*.

Виходами даного блоку є поточні значення заданих координат X та Z , а також ознака завершення місії m .

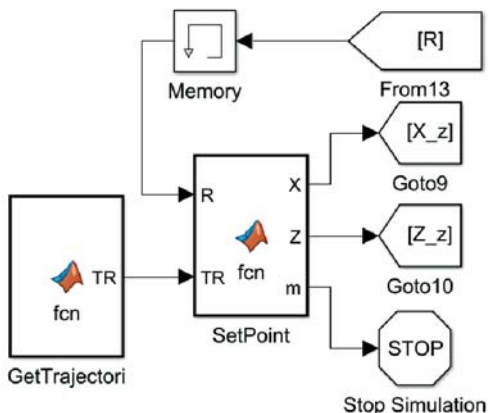


Рисунок 4.11 – Реалізація модуля ССМ

Коли АНПА досягає останньої точки траєкторії ознака m прирівнюється до одиниці і симуляція руху завершується.

Зворотний зв'язок R використано для визначення за траєкторією руху АНПА відстані до поточної заданої координати.

Блок *Memory* необхідний для порівняння з минулою ітерацією симуляції, оскільки на поточній ітерації координати на виході ССМ будуть отримані раніше за матрицю R .

Проходження підводного апарата по заданій траєкторії зображено на рис. 4.12.

Для проходження траєкторії задаємося двома траєкторіями. Перша траєкторія задається контрольними точками до яких апарат повинен дістатися, а другим – ту ж саму траєкторію руху з кроком 1 м.

Основні показники якості траєкторного руху зведено до табл. 4.5.

Під час траєкторного руху для збільшення швидкодії приймається допустиме відхилення від заданої точки, таким чином при наближенні АНПА-РБ до точки з заданою точністю в якості завдання вмикається наступна точка траєкторії.

Автоматизація керування автономним ненаселим
підводним апаратом з радіобуєм

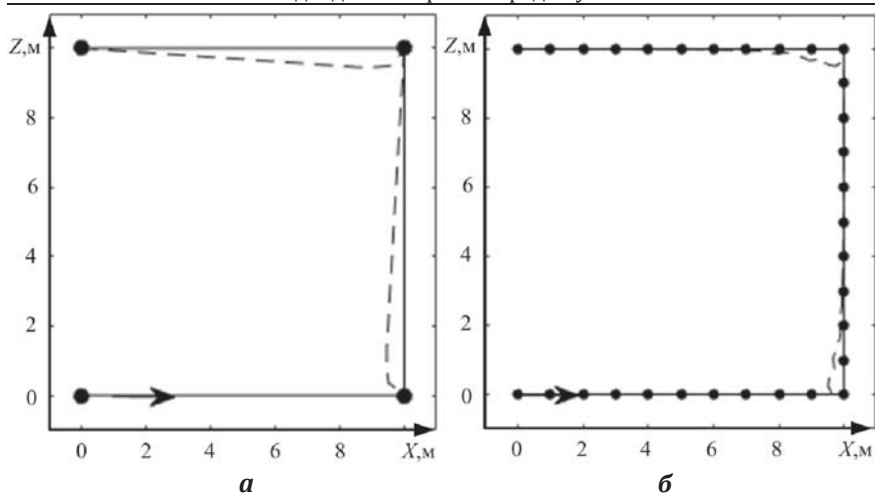


Рисунок 4.12 – Проходження по траєкторії АНПА-РБ:
 - - - - - діюче значення; ——— задане значення;
 а – траєкторія задана контрольними точками;
 б – траєкторія задана точками з кроком 1 м

Таблиця 4.5 – Показники якості траєкторного руху АНПА-РБ

№ з/п	Показник	Контрольні точки	Заданий крок
1	Допустиме відхилення, м	0,1	0,2
2	Час проходження, с	57	115
3	Максимальне відхилення від траєкторії, м	0,3	0,25

Крім того, за допомогою ССМ можна забезпечити режим патрулювання або проходження по заданій траєкторії, яка характеризується масивом точок. Чим більша точність вимагається від траєкторного руху, тим меншою повинна бути відстань між двома заданими точками траєкторії. Таким чином збільшується час руху АНПА-РБ за рахунок більш плавного підходу до заданої точки.

Відхилення від траєкторії складає не більше 30 см, що обумовлено розміщенням двигунів в кормовій частині апарата. Це

дає зміщення центру мас при повороті АНПА–РБ та відсутності можливості керування лаговим рухом.

На закритих акваторіях під час автоматичного руху АНПА можуть виникати перешкоди. Тому для тактичного рівня системи керування також виникає необхідність будувати траєкторію з урахуванням необхідності огинання можливих перешкод.

Для прокладання безпечного маршруту між контрольними точками доцільно використовувати метод потенційних полів. Цей підхід не вимагає ні квантування простору, ні повних попередніх розрахунків.

Суть методу полягає в тому, що кожна перешкода має навколо себе відштовхуюче потенційне поле, сила якого обернено пропорційна відстані від нього; так само існує однорідна сила притягання до цілі. Через близькі постійні інтервали часу обчислюється сума векторів притягання та відштовхування.

Результуючий вектор вказує напрям та швидкість руху [75].

Детальне дослідження показало, що метод потенційних полів здатний провести апарат в будь-яку точку. Основним недоліком методу потенційних полів є попадання в локальні мінімуми, але це зустрічається рідко [76].

В якості сигналу керування, зважаючи на досвід минулих досліджень [77; 78], обирається вектор миттєвої швидкості АНПА–РБ. Результуючий вектор руху буде представлений у вигляді:

$$\bar{v}_p = k_m \bar{r}_m + \frac{k_0}{l_0^2} \bar{r}_0 + \frac{k_1}{l_1^2} \bar{r}_1 + \dots + \frac{k_i}{l_i^2} \bar{r}_i;$$

де $\bar{v}_p$ – результуючий вектор швидкості; k_m – коефіцієнт притягання контрольної точки або об'єкта моніторингу; $k_{0...i}$ – коефіцієнт відштовхування кожної перешкоди; $l_{0...i}$ – відстань від кожної перешкоди до АНПА; r_m – орт направленості дії сили притягання; $r_{0...i}$ – орт направленості дії відштовхування.

При використанні класичного методу потенційних полів виникає декілька ускладнень:

- при наявності великої кількості перешкод збільшується час для розрахунку необхідного вектору швидкості, а також виникає можливість попадання в точку локального мінімуму;
- при використанні даного методу для керування реальним АНПА виникає необхідність застосування гідролокатора кругового огляду, що призведе до збільшення часу сканування простору або використання дорожчого обладнання.

Тому даний метод пропонується удосконалити використанням відштовхуючої дії лише для тих перешкод, які знаходяться на шляху руху АНПА [79]. Для визначення чи лежить перешкода на шляху АНПА, використано промінь, який спрямовано до цілі (основний промінь).

Однак при такому підході до огинання перешкод виникає можливість зіткнення АНПА з перешкодою при невеликій відстані між корпусом АНПА від маршруту руху та краю перешкоди, обумовлена власними розмірами апарата.

Таким чином, необхідно ввести допоміжні промені під певним кутом відхилення від основного направляючого, які будуть виключати дану можливість [80]. Допоміжні промені, в свою чергу, поділяються на горизонтальні та вертикальні.

Горизонтальні допоміжні промені коригують відстань від краю перешкоди до АНПА, коли основний промінь не перетинає її. Задачею вертикальних допоміжних променів є корекція висоти руху над ґрунтом, над або під перешкодами, а також забезпечення можливості огинання невисокої перешкоди.

Для побудови складної траєкторії з огинанням перешкод було розроблено модуль, який формуватиме безпечну траєкторію руху між двома точками акваторії, в якій знаходяться дві перешкоди (рис. 4.13).

Початковими даними для побудови траєкторії є вихідні координати (*Start coordinate*), кінцеві координати (*Finish coordynate*), кути відхилення від основного вектору (*alphad* та *beta*) та характеристики перешкод (*obstacle* та *obstacle2*).

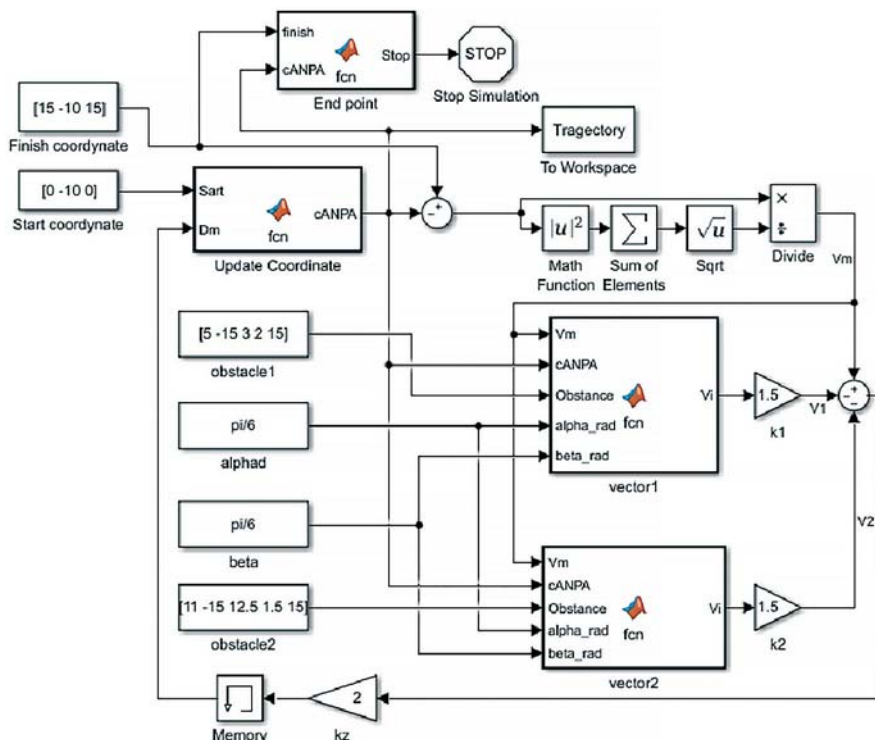


Рисунок 4.13 – Структура реалізації модуля формування траєкторії руху АНПА–РБ в акваторії з перешкодами в *MatLab Simulink*

В даній роботі перешкоди представлені циліндрами та описано матрицями параметрів $[x_i, y_i, z_i, R_i, h_i]$.

Вектор притягування розраховується стандартними блоками *Simulink*, а вектори відштовхування – за допомогою блоків *vector* та *vector3*. Регулювання наближення до перешкоди виконується за допомогою коефіцієнтів $k1$ та $k2$.

Точність та плавність траєкторії регулюється коефіцієнтом kz , де при збільшенні kz збільшується відстань між сусідніми точками траєкторії. Якщо kz прийняти досить великим, це приведе до неправильності обраної траєкторії, а якщо сильно маленьким – до зменшення швидкості траєкторного руху АНПА.

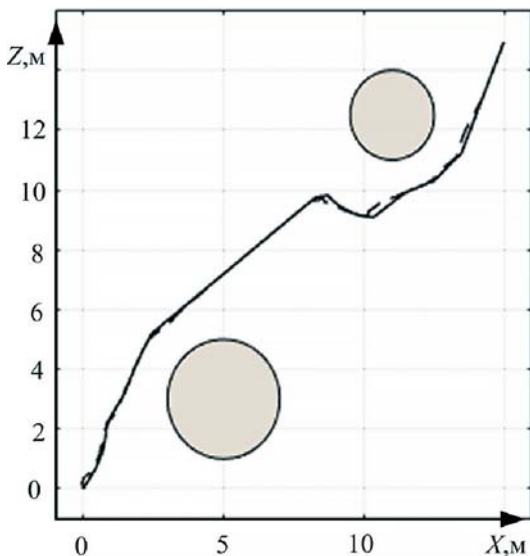


Рисунок 4.14 – Проходження АНПА-РБ по траєкторії з огинанням перешкод:
----- – діюче значення;
————— – задане значення

Побудована траєкторія забезпечує безпечний пересування АНПА-РБ між двома заданими точками на відстані не менше 1,5 м від перешкоди.

Моделювання руху АНПА (рис. 4.14) показує, що з допустимим відхиленням від контрольної точки в 0,2 м, максимальне відхилення від заданої траєкторії не перевищує 30 см.

Таким чином, задачу траєкторного руху можна вважати вирішеною.

Методологію керування траєкторним рухом АНПА-РБ варто обирати в залежності від типу місії.

Так, для обстеження захищеної акваторії гідроакустичними засобами забезпечення точності усталеного руху АНПА є більш пріоритетною поточною задачею САК, ніж точність позиціонування у точці і утримання АНПА на заданій траєкторії.

Якщо у процесі обстеження захищеної акваторії необхідно виконувати якісне фото- чи відеодокументування небезпечних підводних об'єктів, система автоматичного керування АНПА-РБ має функціонувати як комплексна, по чергово реалізуючі всі синтезовані алгоритми керування.

4.3 Порівняння з існуючими системами автоматичного керування

Відома система автоматичного керування з нечітким регулятором, запропонована в [81] для керування корабельною лебідкою, не забезпечує необхідної швидкодії при невеликих відхиленнях (20 с при відхиленні 2 м), при цьому швидкість вибирання кабель-тросу складає 5 м/с.

При відхиленні в 1,2 м синтезована система забезпечує тривалість перехідного процесу 0,9 с зі швидкістю вибирання 3 м/с. Проте, такий ефект досягнуто ускладненням її структури.

Для стабілізації диферента при вертикальному русі апарата ПІД-регулятор з регулюванням диференту за допомогою двох вертикальних рушіїв, представлений в [39], забезпечує перерегулювання 2% від загального кута відхилення апарата та час стабілізації 25 с.

Синтезована ССД на базі горизонтальних рулів в даному режимі має відхилення 3,3 %, але стабілізація проходить за 8 с. При цьому конструктивні особливості АНПА забезпечують менші енерговитрати.

Для стабілізації курсу в [46] пропонується використання ПІД регулятора з інтервальними параметрами, який забезпечує швидкодію 2 с при відхиленні від заданого курсу 56° , а перерегулювання не перевищує 1,6 %.

Синтезована САК при відхиленні 20° забезпечує тривалість перехідного процесу не більшу за 1,75 с, а перерегулювання складає 1,9 %. Крім того, синтезована система забезпечує стабілізацію з меншою кількістю рушійних пристроїв, а також має значно простішу структуру регулятора і не залежить від параметрів об'єкту керування.

Для стабілізації глибини в [82] пропонується використання адаптивного ПІД-регулятора з нечіткою логікою. Даний регулятор забезпечив стабілізацію глибини з початковим відхиленням 1 м за 10 с, а синтезований – 6,5 с при початковому відхиленні 2,5 м.

При цьому синтезований регулятор має більш просту структуру але вихідним сигналом керування є вертикальна швидкість, а не сигнал керування електроприводом.

Результати порівняння синтезованої системи керування з відомими зведено до табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняння основних параметрів систем

Параметр регулювання	Показник	Перегулювання, %	Тривалість процесу регулювання, с (початкове відхилення)	Використання параметрів об'єкта керування	Наявність експертних оцінок
	САК				
L_{KB}	Синтезована	<<1%	0,9 / 1,2 м	Ні	Так
	Нечітка	0,04	20 / 2 м	Ні	Так
Ψ	Синтезована	3,3	8 / 0	Ні	Так
	ПІД	2	25 / 0	Ні	Ні
Φ	Синтезована	1,9	1,75 / 20°	Ні	Так
	ПІД з інтервальними параметрами	< 1,6	2 / 56°	Так	Ні
Y	Синтезована	<<1%	6,5 (2,5 м)	Ні	Так
	Адаптивний (нечітка логіка) ПІД	<<1%	10 (1 м)	Так	Так

В більшості випадків синтезована система забезпечує вищу швидкодію в порівнянні з відомими. При цьому рівень перерегулювання знаходиться в допустимих межах.

Таким чином, порівняння існуючих автоматичного керування систем з синтезованими регуляторами показує, що синтезовані регулятори мають більшу швидкодію, хоча в порівнянні з деякими системами мають більшу величину перерегулювання.

Розділ 5

ПРОЕКТНІ РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ БУКСИРУВАНОГО РАДІОБУЯ

5.1 Особливості проектних розрахунків буксируваного радіобуя

Завданням при проектуванні АНПА–РБ є створити систему, яка, згідно п.р. 1.2, забезпечить відхід РБ від АНПА та квазістатичний вихід його з заданої глибини H руху АНПА у робочу точку режиму сталого буксирування, встановлення у робочий стан КВ (антен, щогл, дротяних антен тощо) та подальше приповерхневе квазістаціонарне буксирування РБ у заданому діапазоні швидкостей АНПА зі стабілізацією глибини занурення h відносно поверхні моря, збирання КВ, квазістатичне повернення і підхід РБ до АНПА та прийняття його на борт.

При цьому головним технологічним ступенем робочого циклу АНПА–РБ є приповерхневе буксирування РБ зі сталою швидкістю v на заданій глибині буксирування h відносно поверхні моря (див. рис. 1.1), тому режими розгону, руху по циркуляції, гальмування та інші суттєво нестаціонарні режими руху не є характерними для роботи АНПА–РБ.

Разом з тим, як показує досвід проектування, завжди існують обмеження по розміщенню елементів системи на АНПА, тобто вимоги щодо мінімізації масо-габаритних розмірів РБ та його кабельної лебідки з КБ.

Підйомна сила НР РБ повинна забезпечити його вихід з заданої глибини H руху АНПА на висоту буксирування $z = H - h$ відносно АНПА при заданій швидкості буксирування v і заданих характеристиках КБ.

Необхідність забезпечення такої підйомної сили і урахування обмежень щодо габаритних розмірів РБ привели до використання біпланової конструктивної схеми РБ.

Основною метою проектування є забезпечення усталеного руху РБ на заданій глибині буксирування h відносно поверхні моря у тому числі і при наявності морського хвилювання заданої бальності $n_{\text{хв}}$.

Основна цільова функція проектною задачі складається в тому, щоб довжина вертикальної щогли КВ $L_{\text{КВ}}$ перевищувала чи дорівнювала сумі середнього заглиблення РБ $h_{\text{ср}}$, половини висоти хвилі 3%-вої забезпеченості $0,5h_{3\%}$ та амплітуди вертикальної качки $A_{3\%}$, яку можна виразити за залежністю [83]:

$$L_{\text{КВ}} \geq h_{\text{ср}} + 0,5h_{3\%} + A_{3\%}. \quad (5.1)$$

Відомо [40], що критерієм оптимальності АНПА–РБ при заданій глибині H і швидкості v руху є критерій вибору сили

натягу T по безрозмірних параметрах $\eta = \frac{z\rho v^2 d}{T}$ і $\chi = \frac{L_{\text{КВ}}}{z}$,

де ρ – густина води; d – діаметр КБ. Це забезпечує визначений стан АНПА і РБ один відносно другого у процесі буксирування. Очевидно, що чим більше значення має параметр η і чим менше параметр χ , тим краще буде система. На перший погляд здається, що доцільно в усіх випадках при проектуванні використовувати величину η_{max} .

Проте потрібно звертати увагу на значення параметра χ . Може статись, що при значенні параметра $\eta = \eta_{\text{max}}$ довжина КБ отримана за параметром χ буде настільки великою, що експлуатація АНПА–РБ буде ускладненою (встановлення-згортання системи), а то й неможливою.

Крім того виникнуть труднощі з розташуванням КБ такої довжини на барабані лебідки та її розміщенням на АНПА. У результаті виграш по натягу T або інших параметрах АНПА при

$\eta_{\max}$ може не виправдати незручності в експлуатації системи та зростання довжини КБ і габаритів КЛ.

По вертикальним переміщенням РБ і основного його функціонального пристрою – вертикального КВ (щогли зовнішньої антени), умовою оптимальності є технічна стійкість, яка забезпечується цільовою функцією задачі проектування (5.1). Середнє заглиблення РБ $h_{\text{ср}}$ встановлюється завданням на проектування, висота хвилі 3%-вої забезпеченості $h_{3\%}$ задається бальністю хвилювання моря n , а амплітуда 3%-вої забезпеченості вертикальної хитавиці $A_{3\%}$ на хвилюванні визначається за величинами діючих сил та їх коефіцієнтів за рівнянням вертикального руху РБ за відомою залежністю [84]:

$$(m + \mu_{33})\ddot{\zeta} + \lambda_{33}\dot{\zeta} + k\zeta = X(t),$$

де m – маса РБ; μ_{33} і λ_{33} – коефіцієнти приєднаної маси та демпфірування; k – коефіцієнт відновлюючої сили системи РБ–КВ; $X(t)$ – збурююча сила.

У лінійному варіанті розв'язку задачі максимальне вертикальне переміщення РБ визначає амплітуду 3%-ї забезпеченості вертикальної хитавиці $A_{3\%}$ на хвилюванні:

$$A_{3\%} = \zeta_{\max}.$$

Теоретичні основи та загальні питання проектування буксированих систем достатньо повно і всебічно розроблені вітчизняними вченими [40; 85]. У цих роботах запропоновано узагальнений порядок проектних розрахунків буксированих систем та їх елементів, який передбачає два головних проектних етапи – попередній та остаточний розрахунки.

Проте, дослідження показали, що проектування АНПА–РБ має ряд особливостей, що не передбачені діючими рекомендаціями і потребують розробки додаткових проектних методик.

До таких особливостей належать:

- жорсткі обмеження по масі та габаритним розмірам РБ;
- обмежена канатомісткість лебідки КБ АНПА;

- наявність зовнішнього корисного вантажу РБ (наприклад, щогл радіозв'язку, які піднімаються під час сеансу зв'язку), який змінює свою просторову форму у процесі застосування;
- вплив зовнішніх збурень на РБ та його КБ у режимі приповерхневого буксирования.

Вказані особливості потребують виконання додаткових розрахунків, які вимагають суттєвого удосконалення традиційного порядку проектування типових ПБС у напрямках:

Вказані особливості потребують виконання додаткових розрахунків, які вимагають суттєвого удосконалення традиційного порядку проектування типових підводних буксированих систем у напрямках:

- розрахунку експлуатаційних характеристик – довжини попущеної частини КБ, зміщення РБ відносно АНПА, сили натягу та кута нахилу на корінному кінці КБ в режимах підйому-спуску РБ;
- оцінювання впливу КБ на кут атаки несучих поверхонь (НП) РБ;
- розрахунку зміни довжини КБ для стабілізації підповерхневого руху РБ;
- розрахунки компенсуючого моменту XO для стабілізації підповерхневого руху РБ (XO РБ складається із стабілізатора (горизонтальний елемент) і кіля (вертикальний елемент), які розташовані у поздовжніх площинах РБ);
- оцінка стійкості квазістаціонарного руху системи.

Нижче розглядаються особливості виконання вказаних розрахунків.

5.2 Дослідження експлуатаційних характеристик АНПА-РБ в режимах підйому-спуску радіобуя

Дослідження проведено для РБ проекту «Арго-Буй», технічні характеристики якого наведено у розділі 1 та у [16; 18]. Розрахунки експлуатаційних характеристик АНПА-РБ – довжини $L_{КБ}$ попущеної частини КБ, зміщення x РБ відносно АНПА,

значення Q сили натягу та кута α_0 нахилу КБ на корінному кінці при різних висотах буксирування РБ над АНПА $z = H - h$ проведено при швидкості набігаючого потоку $v = 2,0$ м/с. Результати представлено у табл. 5.1 та на рис. 5.1, 5.2.

Таблиця 5.1 – Експлуатаційні характеристики АНПА-РБ при різних значеннях z висоти буксирування РБ над АНПА

z , м	Характеристики АНПА-РБ			
	L_{KB} , м	x , м	Q , кН	α_0 , град
5	6	1,6	1,834	69,32
10	11	3,5	1,834	64,98
20	22	9,5	1,834	55,76
40	49	27,6	1,835	40,71
50	66	41,1	1,836	34,32
60	84	56,5	1,837	29,24
70	107	77,0	1,839	24,49
80	133	101,0	1,841	20,62
90	164	130,3	1,843	17,31
100	201	165,9	1,846	14,51

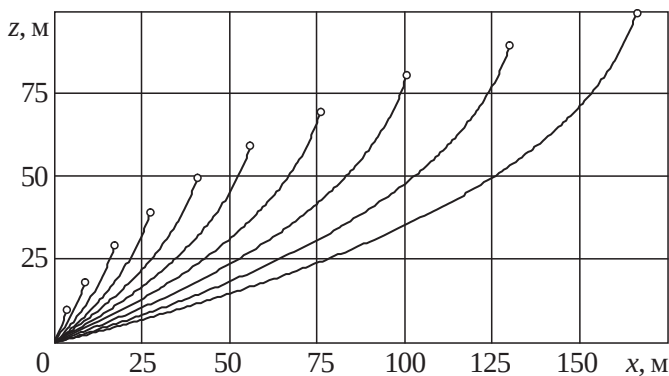


Рисунок 5.1 – Лінії КБ при різних висотах z буксирування РБ над АНПА

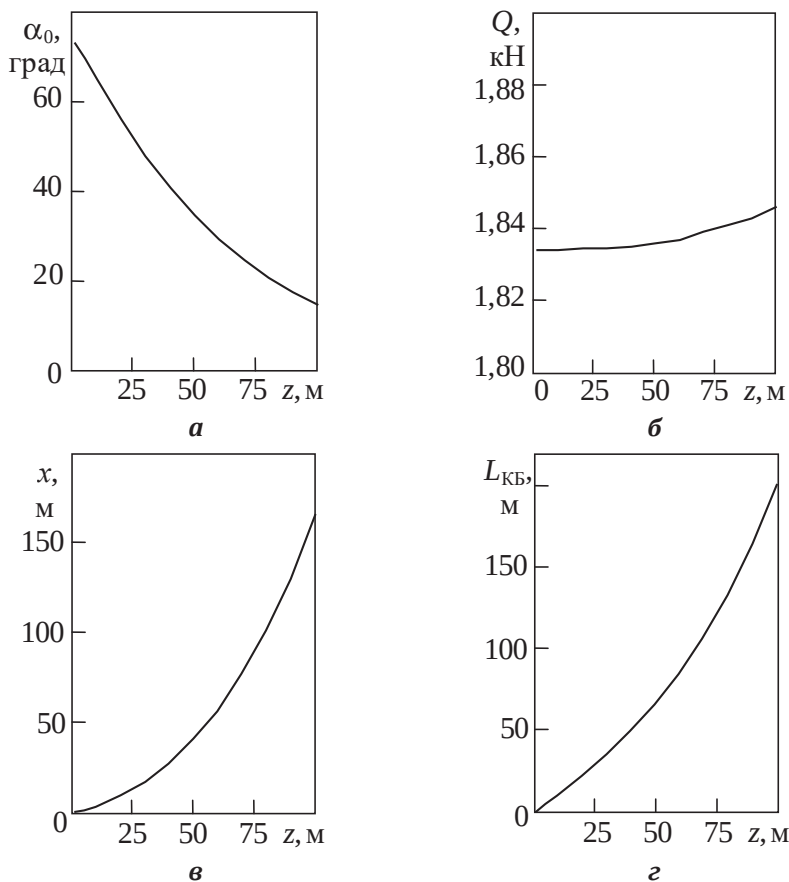


Рисунок 5.2 – Залежність сили натягу Q (**a**), кута нахилу α_0 (**б**) на корінному кінці КБ, зміщення x РБ відносно АНПА (**в**) та довжини попущеної частини L_{KB} (**г**) від висоти z буксирування РБ над АНПА

У ході обробки результатів комп'ютерних розрахунків, згідно з рекомендаціями [86; 87], отримані аналітичні залежності експлуатаційних характеристик АНПА–РБ від висоти z буксирування РБ на АНПА.

Для кута нахилу корінного кінця КБ експоненціальна залежність має вигляд

$$\alpha_0 = 75,267 \exp(-0,016z), \text{ град},$$

для неї максимальна похибка не перевищує 4,7 %.

Як видно на рис. 5.2, графіки залежностей сили натягу Q на корінному кінці КБ, зміщення x РБ відносно АНПА та довжини $L_{\text{КБ}}$ попущеної частини КБ від висоти z буксирування РБ над АНПА мають вигляд парабол, тому вони задовільно описуються квадратичними поліномами, які мають вигляд

$$Q = 1,637 \cdot 10^{-6} z^2 - 4,561 \cdot 10^{-5} z + 1,834, \text{ кН};$$

максимальна похибка не перевищує 0,4 %.

$$x = 0,013z^2 + 0,224z + 0,082, \text{ м};$$

максимальна похибка не перевищує 8,1 %.

$$L_{\text{КБ}} = 0,011z^2 + 0,835z + 0,201, \text{ м};$$

максимальна похибка не перевищує 7,0 %.

Приведені залежності дозволяють, не виконуючи складних розрахунків, з'ясувати вплив висоти буксирування РБ над АНПА на основні експлуатаційні характеристики АНПА–РБ в режимах спуску-підйому РБ.

Аналіз одержаних результатів показує, що зміна z висоти буксирування РБ над АНПА від 1 до 100 м практично не впливає на модуль сили натягу Q на корінному кінці КБ, який при цьому зростає на 0,7 %. Збільшення величини z суттєво впливає на довжину $L_{\text{КБ}}$ попущеної частини КБ, яка зростає тим більше, чим більше значення z .

Так при $z = 50$ м, $L_{\text{КБ}} = 66$ м, а при $z = 100$ м, $L_{\text{КБ}} = 201$ м.

При зростанні висоти буксирування z від 1 м до 100 м зміщення x РБ відносно АНПА збільшується у 582 рази, а кут α_0 нахилу КБ на корінному кінці зменшується у 5 раз (див. рис. 5.2).

Відомо, що КБ нульової плавучості має властивість зберігати свою просторову форму, тобто зберігати довжину попущеної частини та кути нахилу, при зміні швидкості буксирування,

якщо інші характеристики АНПА-РБ не змінюються, тобто при інших швидкостях буксирування значення L_{KB} та α_0 практично не зміняться при відповідних висотах буксирування з і лінії KB будуть мати вигляд, показаний на рис. 5.1. При цьому сила натягу у KB змінюється пропорційно квадрату швидкості набігаючого потоку.

Таким чином, при підйомі РБ від АНПА потрібно попускати KB, при цьому кут нахилу на корінному кінці зменшується, а величина зусилля практично не змінюється. При спуску РБ до АНПА потрібно вибирати KB, при цьому кут нахилу на корінному кінці збільшується при сталому зусиллі в ньому.

5.3 Вплив заглиблення радіобуя на його експлуатаційні характеристики

Основною характерною особливістю KB, який встановлюється на РБ у вертикальній площині (щогли, вертикальні антени тощо), є його обтікання в умовах перетинання з поверхнею води. При цьому визначені характеристики АНПА-РБ забезпечують режим квазістаціонарного буксирування РБ на заданому заглибленні h відносно вільної поверхні моря.

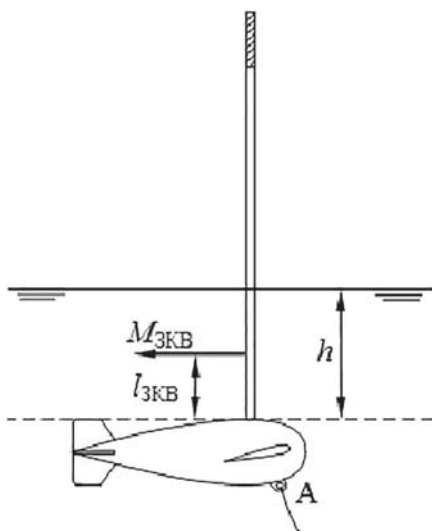


Рисунок 5.3 – Підповерхневий рух РБ із встановленим KB

Встановлення KB у вертикальній площині РБ призводить до виникнення додаткового лобового опору $R_{хKB}$ і диферентуючого моменту M_{KB} на корму РБ (рис. 5.3).

Згідно [63] лобовий опір KB визначається залежністю

$$R_{\text{хЗКВ}} = C_{\text{хЗКВ}} \frac{\rho}{2} S_{\text{ЗКВ}} v^2,$$

де $S_{\text{хКВ}}$ – характерна площа КВ.

Для КВ у вигляді вертикальної циліндричної щогли з діаметром $d_{\text{КВ}}$, яка занурена на глибину h відносно вільної поверхні моря

$$R_{\text{хЗКВ}} = C_{\text{хЗКВ}} \frac{\rho}{2} d_{\text{ЗКВ}} h v^2. \quad (5.2)$$

Диферентуючий момент від КВ буде

$$M_{\text{КВ}} = R_{\text{хКВ}} \times l_{\text{КВ}}, \quad (5.3)$$

де $l_{\text{КВ}} = h/2$ – плече диферентуючого моменту.

Підставимо (5.1) в (5.2) та одержимо

$$M_{\text{ЗКВ}} = C_{\text{хЗКВ}} \frac{\rho}{4} d_{\text{ЗКВ}} h^2 v^2. \quad (5.4)$$

Величина моменту, який диферентує РБ на 1° на корму, дорівнює [88]:

$$M_{1^\circ} = \frac{D \cdot h_m}{57,3},$$

де D – водотоннажність РБ; h_m – метацентрична висота РБ.

Таким чином, кут диференту на корму, який отримає РБ при встановленні у вертикальний стан КВ, визначається залежністю:

$$\varphi = \frac{M_{\text{ЗКВ}}}{M_{1^\circ}} = \frac{57,3 C_{\text{хЗКВ}} \rho d_{\text{ЗКВ}} h^2 v^2}{4 D h_m}. \quad (5.5)$$

Виникнення диференту РБ на корму обумовлює зміну (за звичай, збільшення) підйомної сили його НП і, як наслідок, збільшення висоти з буксирування РБ над АНПА, або навіть аварійний вихід РБ на поверхню води. Задача стабілізації РБ по

висоті буксирування над АНПА може бути вирішена двома шляхами:

- зміною довжини попущеної частини КБ;
- прикладенням компенсуючого моменту за допомогою ХО РБ.

Далі приведемо особливості розрахунків довжини попущеної частини КБ та компенсуючого моменту ХО для стабілізації руху РБ по глибині буксирування h відносно поверхні моря.

5.4 Методика розрахунку зміни довжини попущеної частини КБ для стабілізації підповерхневого руху РБ

Визначені характеристики АНПА–РБ забезпечують режим квазістаціонарного буксирування РБ на заданому заглибленні h відносно вільної поверхні моря. При цьому довжина попущеної частини КБ $L_{\text{КБ}}$, значення гідродинамічних сил лобового опору R_x і підйомної сили R_z РБ відомі і складаються з сил, які виникають на корпусі РБ та його несучих поверхнях, тобто:

$$R_x = R_{x\text{К}} + R_{x\text{НП}},$$

$$R_z = R_{z\text{К}} + R_{z\text{НП}}.$$

Після встановлення у робочий стан вертикального КВ ці сили змінюються та набувають нових значень

$$R_{x1} = R_{x\text{К}1} + R_{x\text{НП}1} + R_{x\text{КВ}}, \quad (5.6)$$

$$R_{z1} = R_{z\text{К}1} + R_{z\text{НП}1}. \quad (5.7)$$

При цьому РБ отримає диферент на корму φ , який визначається співвідношенням (5.5), а кут атаки НП зміниться і буде таким:

$$\alpha_{\text{НП}1} = \alpha_{\text{НП}} + \varphi. \quad (5.8)$$

Згідно попереднім оцінкам при кутах диференту, які не перевищують 5° , додатковими гідродинамічними силами на корпусі РБ, що виникають при цьому, можна нехтувати, тобто $R_{x\text{К}1} = R_{x\text{К}}$ і $R_{z\text{К}1} = R_{z\text{К}}$.

В іншому випадку нові значення сил R_{xK1} і R_{zK1} на корпусі РБ визначають у припущенні, що його корпус є циліндр малого подовження у косому потоці води, використовуючи залежності гідродинамічних коефіцієнтів від кута нахилу до потоку ϕ для круглих циліндрів подовженнями $l = 1, 2, 3, 5$ при $Re = 5,0 \cdot 10^5 \div 8,3 \cdot 10^5$, які наведено в [89].

Значення складових $R_{xНП1}$ і $R_{zНП1}$ одержують з поляри НП РБ для нового кута атаки $\alpha_{НП1}$. Силу опору КВ R_{xKB} визначають за співвідношенням (5.1).

Визначивши величини R_{x1} і R_{z1} , нові значення гідродинамічних коефіцієнтів РБ обчислюють так:

$$C_{x1} = \frac{2R_{x1}}{\rho v^2 S} = \frac{2(R_{xK1} + R_{xНП1} + R_{x3KB1})}{\rho v^2 S};$$

$$C_{z1} = \frac{2R_{z1}}{\rho v^2 S} = \frac{2(R_{zK1} + R_{zНП1})}{\rho v^2 S}.$$

За відомими значеннями коефіцієнтів C_{x1} і C_{z1} , використовуючи табл. 5.2, отриману в результаті комп'ютерного експерименту, визначають нове значення L_{KB1} довжини попущеної частини КБ при встановленому КВ, який викликає диферент РБ.

Величину зміни довжини попущеної частини КБ ΔL_{KB} для забезпечення квазістаціонарного буксирування РБ на заданому заглибленні h відносно вільної поверхні моря після встановлення КВ у вертикальній площині знаходять так:

$$\Delta L_{KB} = L_{KB1} - L_{KB}.$$

Після складання КВ у початкове положення зникають сили, які викликають диферент РБ на корму і для забезпечення подальшого квазістаціонарного руху РБ на заглибленні h відносно вільної поверхні моря потрібно змінити довжину попущеної частини (попустити або вибрати КБ) на величину ΔL_{KB} , тобто повернути у вихідний стан довжину L_{KB} .

Таблиця 5.2 – Залежність довжини L_{KB} від коефіцієнтів C_x і C_z

C_z	Коефіцієнт лобового опору НП РБ C_x										
	0,01	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
	Довжина попущеної частини КБ L_{KB} (у метрах)										
0,20	736	803	809	787	743	697	659	635	618	609	603
0,21	630	700	721	716	672	645	621	597	583	578	572
0,225	529	580	598	601	594	577	560	545	532	529	527
0,25	407	442	469	484	486	485	474	470	470	467	469
0,30	281	300	326	345	352	363	369	371	373	380	384
0,40	186	196	212	222	233	242	251	259	266	272	278
0,60	134	138	144	149	154	162	166	171	177	184	188
0,80	118	120	123	127	130	133	137	141	144	147	151
1,00	111	113	114	117	119	121	124	126	128	131	133
1,20	107	108	110	111	113	114	116	118	119	122	124
1,40	105	106	107	108	109	110	112	113	114	116	117
1,60	104	105	105	106	107	108	109	110	111	112	113
1,80	103	104	104	105	105	106	107	108	108	109	110
2,00	102	103	103	104	104	105	105	106	107	108	108

5.5 Методика розрахунку компенсуючого моменту ХО для стабілізації підповерхневого руху РБ

Як було вказано вище, встановлення КВ у вертикальній площині РБ призводить до виникнення диферентуючого моменту M_{KB} на корму РБ (див. рис. 5.3).

Задача стабілізації РБ по глибині буксирування h відносно поверхні моря може бути вирішена шляхом прикладення компенсуючого моменту за допомогою ХО радіобуя – моменту стабілізатора M_{CT} , який би дорівнював диферентуючому моменту M_{KB} .

Вважають [40], що момент стабілізатора відносно точки буксування A утворюється тільки його підйомною силою R_{zCT} , тобто:

$$M_{CT} = R_{zCT}L_{CT},$$

де L_{CT} – плече сили R_{zCT} , горизонтальна відстань від точки буксування A до центру тиску, який наближено приймають при кінці передньої третини от середньої хорди стабілізатора.

Величина необхідної підйомної сили стабілізатора R_{zCT} для компенсації диферентуючого моменту, викликаного встановленням КВ у вертикальній площині, визначається із рівності

$$M_{CT} = M_{KB}, \quad (5.9)$$

$$R_{zCT}L_{CT} = C_{x3KB} \frac{\rho}{4} d_{3KB} h^2 v^2 \rightarrow R_{zCT} = \frac{C_{x3KB} \rho d_{3KB} h^2 v^2}{4L_{CT}}. \quad (5.10)$$

Використовуючи полярну несучої поверхні стабілізатора за відомим значенням підйомної сили R_{zCT} визначають новий кут атаки стабілізатора α_{CT1} .

Кут $\Delta\alpha_{CT}$, на який необхідно повернути стабілізатор для компенсації диферентуючого моменту M_{KB} , розраховується так:

$$\Delta\alpha_{CT} = \alpha_{CT1} - \alpha_{CT}.$$

У ході робочого циклу АНПА–РБ складання КВ приведе до зникнення диферентуючого моменту M_{KB} , що потребує повороту стабілізатора на кут $\Delta\alpha_{CT}$ у вихідний стан.

5.6 Стійкість квазістаціонарного руху АНПА–РБ

5.6.1 Загальні зауваження

При вивченні руху системи «АНПА–РБ» особливу увагу слід приділяти вивченню її рівноваги, оскільки при відсутності рівноваги технічні характеристики системи будуть відрізнятися від розрахункових.

РБ, який не має стійкості руху, не є придатним до експлуатації. Очевидно, що дослідження стійкості руху системи зводяться до досліджень підповерхневого квазістаціонарного руху РБ, як основного, у якому система зазнає найбільш сильних зовнішніх збурень.

Рівновага РБ у реальних умовах руху АНПА–РБ відповідає рівномірному руху, при цьому сума моментів діючих сил відносно початку координат -- точки буксирування РБ – дорівнює нулю і такий рух є основним.

Нехай в деякий момент часу до РБ прикладені деякі збурюючі сили, а потім дія цих сил припинилась.

Якщо через деякий час збурений рух РБ знов переходить в основний, то рух РБ буде стійким, якщо ж з часом збурений рух все більш відхилюється від основного, то його рух буде нестійким і РБ не є придатним до експлуатації.

Таким чином, стійкість руху РБ є властивість його кінематичних параметрів, які характеризують поступовий та обертальний рух, повертатись до вихідних значень основного руху після відхилення РБ від вихідного стану рівноваги і припинення дії збурення.

Причому, якщо необхідною умовою стійкості стану рівноваги є дія відновлюючих сил і моментів (статична стійкість руху), то достатньою умовою повернення РБ до вихідного стану руху є затухаючі у часі коливання відносно стану рівноваги (динамічна стійкість руху).

Поділення на статичну та динамічну стійкість є досить умовним. Дійсно, статична стійкість дає змогу оцінити поведінку РБ в перший момент часу після припинення дії збурення, а динамічна стійкість дозволяє зробити висновок про стійкість його руху на основі вивчення усього процесу його збуреного руху [40].

5.6.2 Оцінка статичної стійкості руху РБ

При тому, що статична стійкість є тільки необхідною умовою дійсної стійкості РБ, вона має суттєве значення при оцінюванні його руху.

Це пов'язано з тим, що зміна у процесі проектування ступеню статичної стійкості дає змогу впливати у потрібному напрямку на поведінку РБ при його збуреному русі, тобто на його дійсну (динамічну) стійкість.

Докладне вивчення рівноваги і статичної стійкості буксированих апаратів приведено у главі 10 роботи [40]. Розглядають поздовжню статичну стійкість буксированого апарата і бокову статичну стійкість, яка складається з поперечної і стійкості шляху (флюгерної), тому що при крені завжди виникає ризикання апарата та навпаки, ризикання завжди викликає крен.

Крім того існує третій вид стійкості, характерний для РБ, який зв'язаний з АНПА за допомогою КБ – це маятникова стійкість, тобто стійкість при коливаннях РБ разом з КБ відносно точки закріплення його корінного кінця.

Згідно [40] умовою поздовжньої рівноваги РБ є рівність нулю суми всіх поздовжніх моментів, які діють на РБ: $M_{0y} = 0$, або, якщо перейти до безрозмірного коефіцієнта моменту, то $m_{0y} = 0$.

Для поздовжньої статичної стійкості РБ необхідно, щоб крива залежності поздовжнього моменту РБ (або його коефіцієнта m_{0y}) від кута атаки $M_{0y} = f(\alpha)$ мала від'ємний нахил, а умову поздовжньої статичної стійкості РБ записують так:

$$\frac{dM_{0y}}{d\alpha} < 0 \quad \text{або} \quad \frac{dm_{0y}}{d\alpha} < 0.$$

Якщо позначити $\frac{dm_{0y}}{d\alpha} = m_{0y}^{\alpha}$ – коефіцієнт, або ступінь поздовжньої статичної стійкості РБ, то умова поздовжньої статичної стійкості РБ набуває вигляду $m_{0y}^{\alpha} < 0$.

Конструктивно поздовжню рівновагу і поздовжню статичну стійкість РБ забезпечують встановленням кормового стабілізатора, зазвичай це невелика НП, яка створює момент стабілізатора.

Визначення поздовжньої рівноваги РБ і аналіз його поздовжньої статичної стійкості проводять за методикою, яку докладно викладено у [40].

Аналогічно умові поздовжньої рівноваги РБ, умовою рівноваги його шляху є рівність: $M_{0z} = 0$, або $m_{0z} = 0$.

Для флюгерної статичної стійкості РБ необхідно, щоб крива залежності моменту M_{0z} (або його коефіцієнта m_{0z}) від кута рискання β мала від'ємний нахил, а умова статичної стійкості РБ у цьому випадку має вигляд:

$$\frac{dM_{0z}}{d\beta} < 0 \quad \text{або} \quad \frac{dm_{0z}}{d\beta} < 0.$$

Позначають $\frac{dm_{0z}}{d\beta} = m_{0z}^{\beta}$ – коефіцієнт, або ступінь статичної стійкості шляху.

Згідно [40] для забезпечення статичної стійкості шляху РБ потрібно, щоб центр тиску бокової складової гідродинамічної сили, яка виникає при відхиленні РБ від стану рівноваги, знаходився позаду точки буксирування, що досягається конструктивною мірою – встановленням на РБ вертикального стабілізуючого елемента – кіля.

Поперечною статичною стійкістю є здатність РБ автоматично виправляти виникаючий при рисканні крен.

Умова поперечної статичної стійкості РБ записується аналогічно умові статичної стійкості шляху:

$$\frac{dM_{0x}}{d\beta} < 0 \quad \text{або} \quad \frac{dm_{0x}}{d\beta} < 0.$$

Позначають $\frac{dm_{0x}}{d\beta} = m_{0x}^{\beta}$ – ступінь поперечної статичної стійкості.

Момент крену M_{0x} , та відповідно і коефіцієнт моменту крену m_{0x} , залежать від геометричних параметрів НП (форми у плані, кута поперечного V , стріловидності), від розмірів і форми корпусу РБ і ХО (стабілізатора і кіля), від взаємного впливу НП та інших елементів РБ і від дії сили ваги та гідростатичної підтримуючої сили.

Причиною виникнення моменту крену є несиметричність обтікання НП при русі з riskанням. Згідно [40] для забезпечення бокової статичної стійкості РБ, яка складається з поперечної і стійкості шляху (флюгерної), необхідно не тільки виникнення відновлюючих моментів крену і riskання, але і правильне співвідношення між ними.

Задача бокової стійкості РБ полягає в узгодженні відновлюючих моментів M_{0x} і M_{0z} [40]. Конструктивно бокова стійкість руху РБ забезпечується симетричними відносно діаметральної площини (ДП) обводами і навантаженнями РБ та за рахунок його переднього центрування.

Питання розрахунку маятникової стійкості РБ на сьогоднішній день розробленні недостатньо. Але велика кількість проведених морських та басейнових випробувань дозволила встановити, що для забезпечення маятникової стійкості РБ.

Тобто його усталеного буксування у вертикальній площині, яка співпадає з ДП АНПА, або паралельна їй, необхідно, щоб РБ мав переднє центрування і сумарний позитивний момент сили ваги і гідростатичної сили підтримки був достатньо великим.

Конструктивно ці умови досягаються завдяки наявності у РБ корпусу, який має позитивну плавучість та винесеною в передню його частину точки буксування [40].

Вказані вимоги мають бути покладені в основу побудови всіх РБ, які планується використовувати у складі АНПА-РБ.

5.6.3 Оцінка динамічної стійкості руху АНПА-РБ

Практичним результатом дослідження стійкості АНПА-РБ є оцінка динамічних параметрів руху РБ з урахуванням дії КБ, які забезпечать найменші відхилення від основного руху при випадкових збуреннях.

Оцінити дійсну динамічну стійкість руху РБ можливо тільки при вивченні динаміки руху АНПА-РБ.

У сучасній науково-технічній літературі широко висвітлені задачі динаміки буксируваних систем та їх розв'язок [90; 91]. У даній роботі проектні задачі механіки АНПА-РБ розглядались у квазістаціонарній постановці, тому питання динаміки такої системи не описуються. Проте розглянемо деякі положення та короткий опис математичних основ дослідження динамічної стійкості руху АНПА-РБ.

У роботі [40] описані особливості динаміки руху підводної буксированої системи, наведено рівняння поздовжнього та бокового збуреного руху та докладно викладено методику дослідження стійкості руху буксированого апарата.

Рівняння поздовжнього і бокового руху РБ є однорідними диференціальними рівняннями, праві частини яких дорівнюють нулю. Вони описують некерований збурений рух РБ, тобто його власний збурений рух. Фізично такий рух реалізується, якщо до РБ в незбуреному русі прикласти деяке збурення, наприклад збоку КБ, а потім надати самому собі.

Пропонують розв'язувати систему рівнянь руху (поздовжнього, бокового) класичним методом розв'язку лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами [92].

Спочатку знаходять частинні рішення системи у експоненціальному вигляді, далі отримують систему алгебраїчних рівнянь та характеристичне рівняння 6-го ступеню у вигляді:

$$F_6 p^6 + F_5 p^5 + F_4 p^4 + F_3 p^3 + F_2 p^2 + F_1 p^1 + F_0 = 0, \quad (5.11)$$

де p – корні характеристичного рівняння (шість коренів $p_1, p_2, \dots, p_6$).

Кожному кореню рівняння (5.11) відповідає своє частинне рішення, отримане з урахуванням початкових умов руху, що розглядається. Загальне рішення – це сума частинних рішень.

Корені характеристичного рівняння можуть мати як дійсні, так і комплексні значення. Дійсному кореню відповідає аперіодичний рух, а комплексному – коливальний рух. Для асимптотично усталеного незбуреного руху РБ необхідно і достатньо, щоб в усіх коренів характеристичного рівняння були від’ємні дійсні частини.

У роботі [93] досліджено тривимірну модель підводної буксированої системи з двох частин. У моделі рівняння кабелів як гнучких тіл у потоці води створені на основі методу Аблоу та Шехтера. Авторами отримано граничні умови для підводної буксированої системи, яка складається з двох частин. Рівняння руху з шістьма ступенями свободи для моделювання підводного апарата-буксирувальника прийняті для прогнозування його гідродинамічних характеристик транспортного засобу.

Наводяться основні рівняння для буксированої системи, потім розв’язуються за допомогою методу кінцевих різниць. Автори статті використовуються кілька алгоритмів для розв’язування цієї спеціальної форми кінцево-різницевої рівнянь.

Отримані авторами результати вказують на те, що двокомпонентна підводна буксирована система покращує динамічну поведінку буксированого тіла та є простим способом відокремити рух буксирного судна від буксированого КБ.

Якщо при дослідженнях динаміки руху АНПА–РБ не потрібно визначати характер руху, а тільки його кількісну сторону, то стійкість руху можна оцінювати за відомими критеріями Рауса – Гурвица, без розв’язку характеристичного рівняння (5.11), а тільки по його вигляду.

Даний метод застосовується при дослідженнях стійкості поздовжнього і бокового збурених рухів РБ.

Таким чином, питання кількісної оцінки динамічної стійкості підводних буксированих достатньо ґрунтовно розроблені

теоретично і для їх проектної оцінки у кожному проектному випадку слід застосовувати відповідні методи, які використовують адекватні математичні моделі твердих і гнучких тіл у потоці води.

5.7 Узагальнений алгоритм проектних розрахунків АНПА-РБ

На основі поєднання традиційних для даного виду ЗПР розрахунків (форми корпусу РБ, його внутрішнього і зовнішнього КВ, остійності тощо) та нових підходів до проектування АНПА-РБ як єдиної системи [94; 95], доцільним є створення узагальненого алгоритму проектування АНПА-РБ, який би враховував взаємний вплив конструктивних параметрів і експлуатаційних характеристик її елементів.

На рис. 5.4 наведено блок-схему такого алгоритму.

Далі дамо опис блоків узагальненого алгоритму у порядку їх нумерації.

На початку проектування АНПА-РБ задаються вихідними даними (Блок 1) та обмеженнями по характеристикам та параметрам АНПА-РБ (Блок 2), які дає технічне завдання на проектування. До вихідних даних відносяться: глибина руху АНПА H ; зміщення РБ відносно АНПА x ; глибина буксирування РБ h і точність його утримання під поверхнею води; діапазон швидкостей буксирування РБ $v = \{v_1, \dots, v_k\}$; маси і габарити корисного вантажу (внутрішнього та КВ); сило-, енерго- та інформаційні характеристики КВ; характеристики міцності та надійності елементів конструкції АНПА-РБ; характеристики зовнішніх збуджень.

До обмежень (Блок 2) відносяться максимально припустимі конструктивні параметри елементів АНПА-РБ та її експлуатаційні характеристики: максимальні довжина L_{KB} і діаметр КВ d , граничні маси і габарити РБ $l_{PB} \times b_{PB} \times h_{PB}$, глибина h тощо. При цьому приймається припущення, що АНПА має необмежену по-

тужність (його тяглова характеристика лінійна).

Блок 3 – попереднє проектування корпусу РБ (вибір форми корпусу, розрахунок силових конструкцій корпусу, розміщення корисного вантажу та необхідного обладнання, розрахунок головних розмірів РБ, його статичних і гідродинамічних характеристик за відомими методиками (див., наприклад, [96; 97]).

Блок 4 – перевірка відповідності результатів розрахунку заданим обмеженням та вихідним даним. Якщо результати задовільні, то переходять до Блоку 9 – завдання режиму роботи АНПА-РБ. Якщо результати розрахунку голого корпусу РБ не задовольняють заданим обмеженням та вихідним даним, то виконують умовний перехід (Блок 5) з варіацією обмежень у Блоку 6.

Блок 7 – умовний перехід з варіацією вихідних даних у Блоку 8. Якщо усі можливі варіації вихідних даних та обмежень вичерпані, а рішення не знайдено, виходять на кінець алгоритму. Це означає,

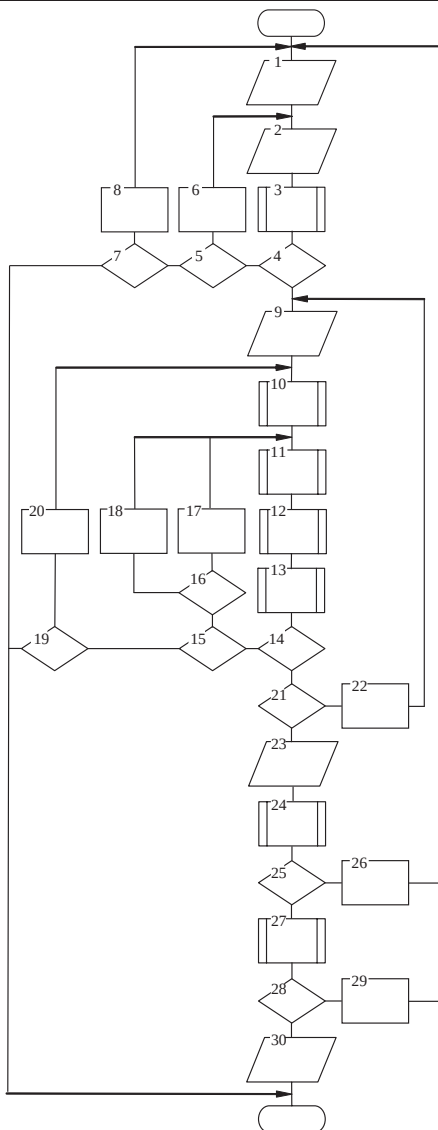


Рисунок 5.4. – Блок-схема узагальненого алгоритму проектних розрахунків АНПА-РБ

що за таких умов (вихідних даних та обмежень) не можливо створити РБ з заданими властивостями.

Блок 9 – завдання режиму роботи АНПА–РБ. Мають місце наступні режими роботи: вихід РБ з «гаражу» і відхід від АНПА та прийняття його на борт (при цьому на РБ діють збурюючі сили, які виникають у результаті турбулізації води корпусом АНПА); вихід РБ у робочу точку режиму сталого буксирування та повернення до АНПА (при цьому рух КБ і РБ у набігаючому потоці, у першому наближенні, можна вважати квазістаціонарним); встановлення у робочий стан КВ (особливістю цього режиму є зміна гідродинамічних характеристик РБ внаслідок появи додаткових виступаючих частин, на яких виникають гідродинамічні сили, сумірні з гідродинамічними силами на корпусі РБ) та збирання його.

Основним режимом роботи АНПА–РБ є підповерхнєве квазі-стаціонарне буксирування РБ зі встановленим КВ (антенами, щоглами, дротяними антенами тощо). Його реалізація пов'язана з необхідністю забезпечення заданого заглиблення корисного вантажу h та стабілізації просторового стану РБ в умовах вітро-хвильових збурень.

Блок 10 – розрахунок конструкції, параметрів та просторової форми КБ при заданому зміщенні x РБ відносно АНПА. Тут визначають діаметр d та довжину $L_{\text{КБ}}$, лінійну вагу у воді $p_{\text{КБ}}$, безрозмірні гідродинамічні коефіцієнти КБ C_n , C_t і C_b , сили Q , T та кути α_0 , β_0 , γ_0 , α_A , β_A , γ_A на його кінцях.

Блок 11 – розрахунок конструкції та параметрів НП та ХО РБ за отриманими у Блоку 10 значеннями сил та кутів на ходовому кінці КБ, а також отриманими у Блоку 3 статичними характеристиками корпусу РБ. Тут обирають тип профілю НП і їх форму у плані, розраховують площу $S_{\text{НП}}$, $S_{\text{ХО}}$, габаритні розміри НП $l_{\text{РБ}} \times b_{\text{РБ}} \times h_{\text{РБ}}$ та ХО $l_{\text{ХО}} \times b_{\text{ХО}} \times h_{\text{ХО}}$, безрозмірні гідродинамічні коефіцієнти $C_{\text{хНП}}$, $C_{\text{уНП}}$, $C_{\text{zНП}}$, $C_{\text{хХО}}$, $C_{\text{уХО}}$, $C_{\text{zХО}}$ та значення підйомної сили $R_{\text{zНП}}$, $R_{\text{zХО}}$ і сили лобового опору $R_{\text{хНП}}$, $R_{\text{хХО}}$.

Блок 12 – розрахунок власне РБ. Отримуються статичні та гідродинамічні характеристики РБ у цілому. Проводяться розрахунки статичної та динамічної стійкості РБ, виконується синтез системи автоматичного керування (САК) та надійності його роботи – виконується оцінка міцності окремих елементів та конструкції РБ у цілому.

Блок 13 – розрахунок АНПА–РБ у цілому для заданого режиму роботи згідно Блоку 9. Тут визначаються силові та просторові характеристики системи (сили Q , T і кути α_0 , β_0 , γ_0 , α_A , β_A , γ_A на кінцях КБ, зміщення x РБ відносно АНПА та довжина попущеної частини КБ L_{KB}), а також виконується синтез САК АНПА як носія РБ згідно [52; 98–100]. Оцінку експлуатаційних характеристик АНПА–РБ в режимах підйому-спуску РБ проводять за результатами досліджень п.р. 5.2. Вплив КВ на кут атаки $\alpha_{НП}$ НП РБ оцінюють за даними п.р. 5.3. Стабілізація підповерхневого руху РБ по глибині буксирування h шляхом зміни довжини попущеної частини КБ L_{KB} та компенсуючого моменту XO M_{XO} розраховується з урахуванням методик, приведених у п.р. 5.4 і 5.5.

Блок 14 – перевірка відповідності розрахованої АНПА–РБ вихідним даним та обмеженням, заданим у Блоках 1 і 2.

Блок 15 – вибір шляху покращення характеристик АНПА–РБ, яке може здійснюватись послідовною варіацією параметрів НП, XO або КБ.

Блок 16 – умовний перехід з варіацією параметрів НП та XO . У більшості проектних випадків за результатами попередніх розрахунків тут приймається рішення про послідовну зміну параметрів НП з урахуванням обмежень Блоку 2 двома шляхами: зміною відносного подовження НП $\lambda_{НП}$ чи збільшення кількості n самих НП. При необхідності покращення характеристик усталеного руху РБ за допомогою XO виконують коригування його параметрів.

Блок 17 – варіація відносного подовження НП та XO . Тут формулюються вихідні дані для розрахунків параметрів НП та

ХО з новим значенням подовження $\lambda_{\text{НП}}$ та $\lambda_{\text{ХО}}$ для Блоку 11 (з урахуванням обмежень Блоку 2).

Блок 18 – збільшення кількості НП. Проводять у тому випадку, коли зміна відносного подовження НП не забезпечила необхідної підйомної сили R_z .

Блок 19 – умовний перехід з варіацією параметрів КБ у Блоку 20. Якщо усі можливі варіації параметрів НП, ХО і КБ вичерпано, а рішення не знайдено, виходять на кінець алгоритму. Це означає, що за таких умов (вихідних даних та обмежень Блоків 1 і 2) неможливо створити АНПА-РБ, тобто проектна задача не має розв'язку.

Блок 21 – умовний перехід з варіацією основних режимів роботи АНПА-РБ у Блоку 22. Таким чином виконується розрахунок характеристик АНПА-РБ для кожного з проектних режимів її роботи.

Блок 23 – виготовлення РБ чи його макетів для басейнових та морських дослідницьких випробувань.

Блок 24 – басейнові випробування РБ чи його макету. Тут визначаються та уточнюються гідродинамічні характеристики РБ та його НП і ХО. Експерименти у дослідовому басейні складаються з вимірів сили опору R_x і підйомної сили R_z , що утворюються на НП РБ у процесі руху, при цьому вивчається ряд факторів, які в тій чи іншій мірі впливають на ці сили (зміна глибини h занурення, швидкості v руху макету РБ, кутів $\alpha_{\text{НП}}$ атаки НП та наявність кінцевих шайб на НП і регулярного хвилювання водної поверхні). Окремо визначається опір води корпусу РБ $R_{\text{ХК}}$.

Блок 25 – перевірка відповідності отриманих у Блоку 24 параметрів РБ вихідним даним та обмеженням і їх варіація у Блоку 26.

Блок 27 – морські дослідницькі випробування АНПА-РБ. Тут визначається працездатність системи та уточнюються її експлуатаційні характеристики. Морські дослідницькі випробування складаються з дослідження характеристик КБ у квазістаціо-

нарному режимі буксування (при різних швидкостях буксування РБ v , глибинах H ходу АНПА і зміщеннях x ходового кінця КБ відносно його корінного кінця, визначаються сили натягу Q і T на його кінцях) та випробування АНПА–РБ у квазістационарному режимі буксування у складі: АНПА, КБ, макет РБ та його КВ (при різних швидкостях руху v , заглибленнях h макету КВ визначаються кути крену θ та диференту ψ макету РБ, значення зусиль T у ходовому кінці КБ і кутів його нахилу α_A). За даними експериментів виконується порівняння результатів теоретичних розрахунків АНПА–РБ з результатами морських дослідницьких випробувань, проводиться уточнення та оптимізація взаємного розташування елементів системи та їх силових характеристик, які забезпечують статичну стійкість РБ та необхідну просторову форму КБ. При цьому уточнюються динамічні характеристики елементів АНПА–РБ, у тому числі вивчається поведінка КБ у потоці води та вплив КВ на поведінку РБ як на тихій воді так і в умовах наявності морського хвилювання. За методичну базу для проведення морських дослідницьких випробувань РБ можливо прийняти матеріали, наведені у додатку Б.

Блок 28 – перевірка відповідності отриманих у Блоку 27 характеристик АНПА–РБ вихідним даним та обмеженням (Блок 1 і Блок 2) і, при можливості, їх варіація у Блоку 29.

Блок 30 – виведення результатів проектних розрахунків. У результаті розрахунків та експериментів визначаються:

- конструктивні параметри РБ: площа $S_{\text{НП}}$, $S_{\text{ХО}}$ і габаритні розміри НП $l_{\text{НП}} \times b_{\text{НП}} \times h_{\text{НП}}$ та ХО $l_{\text{ХО}} \times b_{\text{ХО}} \times h_{\text{ХО}}$, безрозмірні гідродинамічні коефіцієнти лобового опору C_x , бокової C_y та підйомної сили C_z та його статичні характеристики (маси m_i та об'єми V_i , метацентрична висота h_m);
- експлуатаційні характеристики – режими роботи РБ і АНПА–РБ у цілому, довжина $L_{\text{КБ}}$ попущеної частини КБ, зміщення x РБ відносно АНПА та силові характеристики АНПА–РБ – сили натягу Q , T та кути нахилу α_0 , β_0 , γ_0 , α_A , β_A , γ_A на корінному і ходовому кінцях КБ.

Таким чином, розроблений узагальнений алгоритм містить всі основні складові проектних розрахунків та басейнових і морських дослідницьких випробувань АНПА-РБ і може служити теоретичним підґрунтям для синтезу систем автоматичного керування як невід’ємної складової процесу проектування такого виду підводної робототехніки.

ВИСНОВКИ

У монографії розв'язано актуальну прикладну наукову задачу удосконалення системи автоматичного керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм для задач висвітлення підводної обстановки на захищених мілководних акваторіях.

На основі виконаного огляду сучасних автономних ненаселених підводних апаратів х радіобуями показано області їх використання та обґрунтовано доцільність їх застосування в інтересах України для висвітлення підводної обстановки на мілководних її акваторіях. Показано, що таких вид підводної робототехніки має велику робочу зону та при цьому зберігає можливість передачі інформації в режимі реального часу.

На основі математичної моделі силової взаємодії у воді двох рухомих твердих тіл, з'єднаних гнучким зв'язком, було розроблено комп'ютерну імітаційну модель руху системи «автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм», що дало змогу перевірити ефективність синтезованих регуляторів системи автоматичного керування.

На основі застосування математичного апарату нечіткої логіки набула подальшого розвитку двоконтурна система автоматичного керування кабельною лебідкою підводного апарата, яка дає змогу підтримувати оптимальну, по критерію мінімальної сили натягу, довжину випущеної частини кабель-буксиру при зміні глибини занурення, що забезпечує підвищення енергоефективності при русі апарата та стабілізації його диферента.

Удосконалено структуру стабілізатора диферента на базі нечіткої логіки, що забезпечує підтримання горизонтального положення автономного ненаселеного підводного апарата за допомогою горизонтальних рулів. Особливістю запропонованої

системи є регулятор напрямку, який, змінюючи кут повороту крила по відношенню до набігаючого потоку, забезпечує його ефективну роботу.

На базі нечітких регуляторів удосконалено систему керування плоским вертикальним рухом з поворотом підводного апарата, з пріоритетним розподіленням сигналів керування маршовими електрорушійними пристроями, що забезпечує більш ефективне їх використання в задачах повздовжнього руху та повороту.

Для запропонованої структури рушійно-кермового комплексу автономного підводного апарата з радіобуєм на основі нечітких регуляторів синтезовано систему позиціонування в робочій точці, що дає змогу ефективно застосовувати такий апарат в задачах інспекції підводних об'єктів.

Розроблено узагальнений алгоритм та виконано проектні розрахунки основних експлуатаційних режимів буксируваного радіобуя для відомої підводної системи «АНПА-РБ» проекту «Арго-Буй», які виявили особливості експлуатації такої системи та які утворюють теоретичну основу для синтезу високоефективних систем автоматичного керування для неї.

Проведення морського натурного експерименту довело працездатність роботи нечіткого регулятора курсу в складі системи керування плоским вертикальним рухом автономного не-населеного підводного апарату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Underwater Communications for UUV, AUV, ROV: [electronic recourse]. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/underwater-communications>.
2. Sandra Sendra; Jaime Lloret; Jose Miguel Jimenez; Lorena Parra. Universitat Politècnica de València. *Published in: IEEE Sensors Journal*. Valencia, Spain. Underwater Acoustic Modems. 2016. Volume 16, Issue 11, June 1. P. 4063–4071. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2434890.
3. Giuseppe Schirripa Spagnolo, Lorenzo Cozzella, Fabio Leccese. Underwater Optical Wireless Communications. *Overview. Sensors*. 2020, 20(8), 2261; <https://doi.org/10.3390/s20082261>.
4. Ian F. Akyildiz; Pu Wang; Zhi Sun. Realizing underwater communication through magnetic induction. *Published in: IEEE Communications Magazine*. 2015. Volume 53. Issue 11. November. P. 42–48. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7321970.
5. Overview: Underwater Communications for UUV, AUV, ROV: [electronic recourse]. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/underwater-communications>.
6. Блинцов В. С., Магула В. Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. К.: Наукова думка, 1997. 140 с.
7. David Levin. Wireless communication system for real-time ROV control. WHOI, January 16, 2013: [electronic recourse]. URL: <https://www.oedigital.com/news/459107-wireless-communication-system-for-real-time-rov-control>.
8. Syed Agha Hassnain Mohsan 1 & Alireza Mazinani 2 & Nawaf Qasem Hamood Othman 3 & Hussain Amjad. Towards the internet of underwater things: a comprehensive survey. *Earth Science Informatics*. DOI:10.1007/s12145-021-00762-8.
9. Блинцов В. С., Щепелев С. В., Ольшевский С. И. Исследование влияния параметров кабель-троса двухзвенной подводной системы для случая «обратной буксировки». Сб. «Морские технологии». Николаев: НКИ, 1993. С. 19–24.

10. N. A. Norton, A. Healey et al. (1995). An Experimental Study of an Integrated GPS/INS System for Shallow-Water AUV Navigation (SANS). International Symposium On Unmanned Untethered Submersible Technology (University Of New Hampshire-Marine Systems): [electronic recourse]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Experimental-Study-of-an-Integrated-GPS%2FINS-for-Norton-Healey/ac76a37b2155c8de175546794b90a1fda935df9c#paper-header>.
11. Буруніна Ж. Ю. Проектні задачі механіки підводних буксированих систем з підйомними апаратами. *Зб. наук. праць УДМТУ*. Миколаїв: УДМТУ, 2003. № 2(388). С. 10–19.
12. Блінцов О. В., Надточий А.В. Узагальнена методика оцінки ефективності підводної техніки у проектах глибоководної археології. *Східно-європейський журнал передових технологій*. Харків, 2014. № 1/3 (67). С. 25-29. ISSN 1729-3774.
13. Bykanova Yu., Kostenko V. V., Michailov D. N. Development of Towed Radio Buoy for AUV. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 720 (2021) 012003. doi:10.1088/1755-1315/720/1/012003.
14. A Submarine Communication Buoy System. Armed Services (1961). Technical Information Agency Arlington Hall Station Arlington 12, Virginia. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0321515.pdf>.
15. AN/BSQ-5 Towed Buoy: [electronic recourse]. URL: <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/weaps/an-bsq-5.htm>.
16. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: монографія / С. С. Рижков, В. С. Блінцов, Г. В. Єгоров та ін.; за ред. С. С. Рижкова. Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. 340 с.
17. Блинцов В. С., Лонг Н. Т. Автоматизация управления движением однозвенной подводной буксируемой системы с подъемным буксируемым аппаратом. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2005. № 6/2(18) С. 11–14.
18. Підводні апарати. Рекламно-інформаційне видання. Миколаїв: НУК, 2020. 31 с.
19. Gladius Submersible Underwater Drone: [electronic recourse]. URL: <https://www.rccorner.ae/gladius-submersible-underwater-drone>.
20. Blintsov V., Maidaniuk P. Classification on Projects for the Protection of Marine Critical Infrastructure Facilities. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2019. № 3(59). P. 80–89.
21. Maritime attacks: detecting underwater terrorist threats. 2007. 19 November: [electronic recourse]. URL <https://www.rusi.org/publication/maritime-attacks-detecting-underwater-terrorist-threats>.

22. Anti-frogman techniques. Academic: web-site. URL: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/1312355>.

23. Molchan M. The Role of Micro-ROVs in Maritime Safety and Security. *Mochlan Marine Sciences*. 2005. P. 44. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.119.3003&rep=rep1&type=pdf>.

24. Mine Countermeasure (MCM) set to be unmanned and autonomous: [electronic recourse]. URL <https://www.naval-technology.com/comment/mine-countermeasure-mcm>.

25. Внутрішні водні шляхи Європейського Союзу. Інформаційна довідка, підготовлена Європейським інформаційно-дослідницьким центром на запит народного депутата України: [електронний ресурс]. URL: <http://radaprogram.org/sites/default/files/infocenter/publications/9.pdf> (дата звернення 30.04.2019).

26. Офіційний сайт Державного підприємства «Укрводшлях»: [електронний ресурс]. URL: <http://ukrvodshlah.org.ua> (дата звернення 30.04.2019).

27. Типове положення про службу морської безпеки порту. Наказ Міністерства інфраструктури України від 15.04.2013 р., №22.

28. Anatoly Nadtoshy. Identification of risks in the course of managing the deep sea archaeological projects using marine robotics. *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*. 2016. № 6. P. 59–64.

29. Комплексы инженерно-технических средств охраны акваторий: каталог продукции. АО «ТЕТИС Комплексные Системы». 2016. С. 68.

30. Iftikhar B. Abbasov. Exploration and Monitoring of the Continental Shelf Underwater Environment. Scrivener Publishing, 2018. P. 318. URL: <https://www.wiley.com/en-as/Exploration+and+Monitoring+of+the+Continental+Shelf+Underwater+Environment-p-9781119488286>.

31. Сірвчук А. С. Технологія моніторингу підводної обстановки на захищеній акваторії за допомогою підводного апарата з керуванням через радіобуй. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Херсон, 2017. С. 250–253.

32. Anatolii V. Nadtchii. Conceptual model of management of projects of the working of five archaeological researches. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2016. № 1–2(5). P. 139–151.

33. Морские порты Украины: веб-сайт / ООО СИФ-СЕРВИС: URL: <http://www.sifservice.com/index.php/informatsiya/porty-ukrainy/morskie-porty>.

34. Сіривчук А. С. Розробка системи стабілізації диференту автономного підводного апарата з радіобуєм. *Збірник наукових праць НУК*. Видавничий дім «Гельветика», 2019. № 1. С.121–128.
35. Louis Andrew Gonzalez Design, modeling and control of an autonomous underwater vehicle. *Bachelor of Engineering Honours Thesis*. 2004. URL: <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2004-AUV-Gonzalez.pdf> (date of application 20.03.2020).
36. Song Y. S., Arshad M. R. Passive hydrostatic stability design of a box-shaped autonomous underwater vehicle. *IEEE international symposium on robotics and intelligent sensors*. 2015. P. 180–185. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915038387>.
37. Гой В. А., Костенко В. В. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота. *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 1(21). URL: <http://jmntp.febras.ru/journal/1-21-2016/4-14.pdf> (дата обращения 20.03.2020).
38. Блінцов В. С., Войтасик А. М. Сучасні задачі автоматичного керування самохідною прив'язною підводною вантажною системою. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. №3. С. 49–55.
39. Budiyo Agus, Anam Hujjatul, Setiawan Joga. Simulation and Dynamic Analysis of Remotely Operated Vehicle (ROV) Using PID Controller for Pitch Movement. *Marine and Underwater Science and Technology*. 2015. № 1. P. 23–31.
40. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы: учеб. пособие. Л.: Судостроение, 1981. С. 304.
41. Чан Там Дык Синтез регулятора глубины буксируемого подводного аппарата для установившегося режима движения. *Вісник НУК*. 2012. № 2. С. 249–255.
42. Kuhn Vinicius N., Paulo Drews-Jr, Sebastião C P Gomes, Silvia Silva da Costa Botelho Automatic Control of a ROV for Inspection of Underwater Structures Using a Low Cost Sensing. *Journal Of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2014. doi: 10.1007/s40430-014-0153-z.
43. Блінцов В. С., Надточій В. А. Сучасні задачі автоматизації керування самохідними прив'язними підводними системами з напілним обладнанням. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 2. С. 79–83.
44. Jia Wang Chen, Huangchao Zhu, Lei Zhang Yuxia. Sun Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization. *Ocean Engineering*. 2018. № 156. С. 217–223.
45. Zhanna Yu. Burunina, Andrii M. Voitasyk, Leo T. Aloba, Viktor I. Korytskyi, Andriy S. Sirivchuk. Experimental Study of Group Control Laws

for an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle as a Group Agent. *Ship-building and Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10). P. 116–126.

46. Sergey A. Gayvoronskiy, Ivan V. Khozhaev, Tatiana A. Ezangina Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017. № 6. P. 378–384.

47. Darshana Makavita, Hung Duc Nguyen, Dev Ranmuthugala Fuzzy Gain Scheduling Based Optimally Tuned PID Controllers for an Unmanned Underwater Vehicle. *International Journal of Conceptions on Electronics and Communication Engineering*. 2014. № 2. P. 7–13.

48. Sulaiman Marizan, Mohd Aras, Mohd Shahrieel, Abdullah S., Othman SY. Fuzzy logic controller for depth control of underwater remotely operated vehicle. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2016, 30th September. № 91. P. 275–288.

49. Шигапов Р. Д. Обучение нейро-нечеткой системы управления характеристикам заданной системы управления движением необитаемого подводного аппарата. *Автоматизация процессов управления*. 2012. № 28/2. С. 44–48.

50. Zaopeng Dong, Lei Wan, Tao Liu, Jiayuan Zhuang. Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*. 2015. P. 1402–1407.

51. Подпорин С. А. Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе. *Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА*. 2011. № 19. С. 156–165.

52. Blintsov O., Korytskyi V., Sokolov V. Synthesis of precise automatic control system of a second order object in uncertainty conditions. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 6. P. 1218–1228.

53. Thekkedan M. D., Chin C. S., Woo W. L. Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Application*. 2015. № 14. P. 1–12. doi: 10.1007/s11804-014-0000-0.

54. Londhe P. S., Santhakumar M., Patre B. M., Waghmare L. M. Robust Nonlinear Task Space Position Tracking Control of an Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator System. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Busan, Korea, 2015. P. 1713–1718. doi: 10.1109/AIM.2015.7222793.

55. Chuanfeng, Wang, Fumin Zhang, Dirk Schaefer. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. № 20(2). P. 199–212. DOI 10.1007/s00773-014-0259-0.

56. Блінцов О. В., Сірвчук А. С. Концепція роботизованого моніторингу підводного середовища на основі застосування прив'язних підводних апаратів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. №6/3(72). С. 16–21.

57. Блінцов О. В., Надточій В. А. Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи. *Збірник наукових праць НУК*. 2013. № 1(446). С. 77–82.

58. Zaopeng Dong, Lei Wan, Tao Liu & Jiayuan Zhuang Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*. 2015. P. 1402–1407.

59. Сірвчук А. С. Структура системи керування автономним підводним апаратом з радіобуєм. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування: третя всеукраїнська науково-технічна конференція*. Тернопіль, 2017. С. 41–42.

60. Блінцов О. В., Надточій В. А. Автоматизація керування одноканковими самохідними прив'язними підводними системами: навчальний посібник. Миколаїв: Вид-во НУК, 2014. 124 с.

61. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.

62. Блінцов О. В. Математична модель динаміки просторового руху кабель-троса прив'язної підводної системи. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2012. № 5–6(445). С. 61–63.

63. Справочник по теории корабля / за ред. Я. И. Войткунского. Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1985. 544 с.

64. Блінцов В. С., Красюк О. Н. Особенности создания погружных электромеханических систем для подводной робототехники в целом и для подводных аппаратов в частности. НТУ «ХПИ». 2010. С. 353–355.

65. Ставинський А. А., Блінцов С. В. Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2004. № 3(396). С. 161–166.

66. Лукомский Ю. А., Пешехонов В. Г., Скороходов Д. А. Навигация и управление движением судов: учебник. СПб.: Элмор, 2002. С. 360.

67. Блінцов О. В. Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2016. № 49(1221). С. 18–24.

68. Справочник авиационных профилей: веб-сайт / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева URL: https://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf.

69. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радиоаматор, 2008. 972 с.

70. Sebastian O. H. Madgwick An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. 2010. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (date of application 20.03.2020).

71. Trifonov V. Natural Geometry of Nonzero Quaternions. *International Journal of Theoretical Physics*. Springer. Netherlands, 2007. № 46/2. P. 251–257.

72. MPU-9250 Product Specification: [electronic recourse]. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf> (date of application 20.03.2020).

73. Майстренко А. В., Светлаков А. А., Старовойтов Н. В. Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов. *Доклады ТУСУРа*. 2009. № 2(20). С. 83–88.

74. Сірівчук А. С. Синтез регулятора позиціонування підводного апарата пошукового типу. *Підводна техніка і технологія: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: у 2 ч.* Миколаїв: НУК, 2019. Ч. 1. С. 52–55.

75. Стаут Б. Программирование магических игр: Алгоритм поиска пути / пер. Каменский: [электронный ресурс]. Москва, 1996. URL: <http://pmg.org.ru/ai/stout.htm#detour> (дата обращения 20.03.2020).

76. Трошков Г. А., Грознова А. А. Метод устойчивой локализации особенностей потенциальных полей. *Физика Земли*. Москва, 1980. № 11. С. 96–101.

77. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений. *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления*. Москва, 2014. № 19. С. 67–78.

78. Платонов А. К., Кирильченко А. А., Колганов М. А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы: [электронный ресурс]. *Препринт ИПМ*. Москва, 2001. № 40. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2001/prep40/prep2001_40.html (дата обращения 20.03.2020).

79. Сірівчук А. С. Модуль автоматизованого прокладання маршруту при різних задачах моніторингу підводного середовища. *Інновації в*

суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2015. С. 330–331.

80. Сірвчук А. С. Розробка модуля керування траєкторією руху для симулятора тривимірного руху підводного апарата. *Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: матеріали міжнарод. наук.-техн. конференції*. Миколаїв, 2015. С. 58–59.

81. Шигапов Р. Д. Синтез нечеткого регулятора для управления корабельной лебедкой. *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: 37-я всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ)* (Ульяновск, 22–23 сентября 2011 г.). Ульяновск: УЛГТУ, 2011. С. 127–130.

82. Darshana Makavita, Hung Duc Nguyen, Dev Ranmuthugala Fuzzy Gain Scheduling Based Optimally Tuned PID Controllers for an Unmanned Underwater Vehicle. *International Journal of Conceptions on Electronics and Communication Engineering*. 2014 . № 2. Р. 7–13.

83. Буруніна Ж. Ю. Вплив параметрів кабель-буксира на характеристики буксированої системи з підйомним підводним апаратом. *Зб. наук. праць УДМТУ*. Миколаїв: УДМТУ. 2003. № 4(390). С. 16–24.

84. Автоматизированные системы с буксируемыми приборами в океанологических исследованиях / Гайский В. А., Артемов Ю. Г. Блинков В. А. и др. Киев: Наукова думка, 1987. 176 с.

85. Динамика подводных буксиремых систем / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко, Л. С. Астахов. СПб: Судостроение, 1995. 200 с.

86. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / пер. с англ. Е. Г. Коваленко. М.: Мир, 1972. 384 с.

87. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с.

88. Некрасов В. А. Упрощенный способ определения параметров якорной цепи. *Труды НКИ*. Николаев: НКИ, 1977. Вып. 126. С. 32–43.

89. Басин М. А., Шадрин В. П. Гидродинамика крыла вблизи границы раздела сред. Л.: Судостроение, 1980. 304 с.

90. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисневич. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. 324 с.

91. Chuanlong Liu, Yuwen Zhang, Xulong Yuan. Simulation of Recycling Cable in Underwater Towed System: [electronic recourse]. *Proceedings of*

2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012). P. 70–72. URL: <https://www.atlantis-press.com/article/3780.pdf>.

92. Подводная технология / В. А. Коробков, В. С. Левин, А. В. Лукошков, П. П. Серебrenицкий. Л.: Судостроение, 1981. 240 с.

93. Jiaming Wu Allen, T. Chwang. A hydrodynamic model of a two-part underwater towed system. *Ocean Engineering*. 2000. Volume 27. Issue 5. May. P. 455–472. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(99\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(99)00006-2).

94. Blintsov V., Kucenko P. Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9(101). P. 15–26. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2019.179486.

95. Blintsov O., Sokolov V., Kucenko P. Formulation of Design Tasks of Towed Underwater Vehicles Creation for Shallow Water and Automation of their Motion Control. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. № 2. P. 30–42. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00854.

96. Блінцов В. С., Куценко П. С. Генезис технологій та шляхи удосконалення проектування та побудови буксированих підводних систем для мілководних акваторій. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2020. № 3. С. 19–27. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202109.

97. Blintsov V., Klochkov O. Generalized Method of Designing Unmanned Remotely Operated Complexes Based on the System Approach. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. № 2. P. 43–51. DOI: 10.21303 / 2461-4262.2019.00878.

98. Блінцов О. В., Надточій В. А. Система автоматичного керування кабельною лебідкою прив'язної підводної системи. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2013. №1. С. 77–82.

99. Надточій В. А. Інтеграція керування самохідною прив'язною підводною системою у складі морського технологічного комплексу. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 5/4(65). С. 40–44.

100. Надточій В. А. Синтез регулятора диференту підводного апарату при роботі зовнішнього начіпного обладнання. *Вісник НУК*. Миколаїв, 2014. № 3.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма і методика морського натурного експерименту з перевірки працездатності регулятора курсу системи автоматичного керування рухом автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм (проект)

ЗМІСТ

1 Підстави для проведення випробувань	4
2 Об'єкт випробувань	4
3 Мета випробувань	5
4 Організація проведення випробувань	5
4.1 Загальні положення	5
4.2 Обсяг випробувань	6
4.3 Звітність	9
5 Порядок і умови проведення морських натурних випробувань	10
6. Метрологічне забезпечення випробувань	11
7 Програма випробувань	12
8 Методики випробувань	13
8.1 Формування задачі керування»	13
8.2 Порядок проведення морського натурного експерименту	13
Додаток №1 Взірець протоколу морських натурних випробувань	15
Додаток № 2 Довідка про метрологічне забезпечення науково-дослідних робіт	16

АНОТАЦІЯ

Ця програма і методика морських натурних випробувань (надалі ПМ) поширюється на систему автоматичного керування рухом дослідного макету автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм і визначає обсяг і методи проведення випробувань.

Програма та методика розроблена в НУК ім. адм. Макарова.

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

Підставою для проведення випробувань є НДР № 2047 «Розробка методик створення і використання в Україні безекіпажних підводних апаратів оборонного призначення», шифр «Апарат», № державної реєстрації 0116U000004D (для службового користування).

Шифр «Апарат». Замовник – МОН.

2 ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

Дослідний макет автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм (АНПА РБ) на базі прив'язної підводної системи проекту «Гідрограф», яка виготовлена в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (далі – НУК ім. адм. Макарова).

Склад комплексу обладнання що піддається випробуванням:

– дослідний макет автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм;

– апаратно-програмне забезпечення системи автоматичного керування.

На випробування пред'являється дослідний макет АНПА РБ, виготовлений за конструкторською документацією, що пройшла перевірку сектору стандартизації і метрології НУК ім. адм. Макарова.

Керуючим впливом для дослідного макету АНПА РБ є сигнали керування маршовими рушійними пристроями $u_r \in [-1, 1]$ та $u_l \in [-1, 1]$. Маршовий рух вперед забезпечується при $sign(u_l) = sign(u_r)$, а поворот на лівий борт $u_r > u_l$, на правий – $u_r < u_l$.

3 МЕТА ВИПРОБУВАНЬ

Морський натурний експеримент дослідного макета АНПА РБ проводяться з метою визначення працездатності регулятора курсу в складі системи автоматичного керування рухом АНПА РБ.

4 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

4.1 Загальні положення

4.1.1 «Програма і методика» поширюється на дослідний макет АНПА РБ.

4.1.2 Живлення дослідний макету АНПА РБ та управління нею здійснюється з борту надводного судна через кабель-трос. Апаратно-програмне забезпечення системи автоматичного керування розташовується на борту надводного судна.

4.1.3 Випробування проводяться в акваторії Чорного моря в територіальних водах України.

4.1.4 Випробування проводяться комісією, яка призначається наказом керівника підприємства-виконавця. Технічне керівництво випробуваннями здійснює науковий керівник або відповідальний виконавець НДР №2047 або співробітник підприємства-виконавця, призначений наказом за підприємством.

4.1.5 Випробування можуть бути перервані або припинені в разі:

- невідповідності зразка основним вимогам ТЗ;
- виходу з ладу обладнання.

Припинення випробувань оформляється актом.

4.1.6 Оцінка результатів випробувань повинна містити конкретні і точні формулювання, що забезпечують їх однозначне розуміння, із зазначенням, при негативних результатах випробувань, невиконаних вимог контракту, шляхів усунення та порядку перевірки усунення виявлених дефектів.

4.2 Обсяг випробувань

Згідно технічному завданню на САК АНПА РБ повинна забезпечувати утримання курсу $\varphi \in [-180^\circ; 180^\circ]$ при маршовому русі зі швидкістю від 0 до 0,5 м/с. Тривалість перехідних процесів САК з режиму насичення не повинна перевищувати $t_{\max} = 5$ с. Перерегулювання σ повинно не перевищувати 10%.

Блок сенсорів кутової орієнтації має обмежену точність вимірювання. Даний модуль включає в себе трьохосовий акселерометр, трьохосовий магнітометр та трьохосовий гіроскоп, що виконані на одній мікросхемі. Такий підхід виключає можливість не співвісної установки на підводному апараті.

Для часткової компенсації точності вимірювання використовується фільтр Маджвіка. В якості інструменту використовуються кватерніони, які дозволяють використовувати дані акселерометра і магнітометра для аналітичних обчислень і оптимізації методом градієнтного спуску в отриманні похибки напрямки гіроскопа у вигляді похідного кватерніона.

Для маршового руху використовується незмінний сигнал керування, що забезпечує однонаправлений упор маршових рухів та становить 0,5 заданий у відносних одиницях, а сигнал, різниці упорів маршових рухів задається регулятором курсу.

Перерегулювання σ являє собою максимальне відхилення курсу φ від нового заданого значення в бік, протилежний від початкового значення та визначається за виразом:

$$\sigma = \left(\frac{\varphi_{\max} - \varphi_z}{\varphi_z} 100\% \right).$$

Перерегулювання як досліджувана величина визначається за формулою:

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \varepsilon_{\sigma},$$

де $\bar{\sigma}$ – загальне середнє значення перерегулювання; ε_{σ} – абсолютна похибка значення σ .

Оскільки дослідження САК відбувається в мінливому середовищі, а перерегулювання є абсолютною величиною, то результуючим значенням є середнє арифметичне значення:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N};$$

$$i = 1, 2 \dots N;$$

де σ_i – перерегулювання поточного вимірювання (перехідного процесу); i – номер вимірювання; N – кількість вимірювань.

Похибка вимірювання перерегулювання обчислюється як середнє квадратичне значення випадкової складової та похибки вимірювань:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sqrt{\varepsilon_{\sigma}^2 + \varepsilon_{\sigma_i}^2},$$

де ε_{σ} – випадкова складова похибки вимірювань σ_i ; ε_{σ_i} – складова похибки вимірювань, яку вносить датчик курсу.

Для оцінки випадкової похибки ε_{σ} використовують середнє квадратичне відхилення на підставі незміщеної оцінки дисперсії:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{N - 1}}.$$

Вплив класу точності датчика на похибку вимірювань визначається його класом точності:

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{k_z \beta y_{\max}}{3 \cdot 100\%},$$

де β – клас точності датчика курсу; $y_{\max}$ – граничне значення вимірюваного параметру (курсу); k_z – коефіцієнт Ст'юдента.

Тривалість перехідного процесу є випадковою величиною, оскільки вона включає в себе також час перерегулювання та похибку керування. Обчислюватимемо її аналогічно помилці керування ε :

$$\tau = \bar{\tau} \pm \varepsilon_{\tau},$$

де $\bar{\tau}$ – середнє арифметичне тривалості перехідного процесу; ε_{τ} – абсолютна похибка величини τ .

Чисельне значення величини τ_i визначається з часу виходу САК з режиму насичення $t_{s(i)}$ та вважається завершеним при досягненні курсу в діапазоні $\pm 5\%$ від середнього значення встановленого перехідного процесу $t_{e(i)}$:

$$\tau_i = t_{e(i)} - t_{s(i)}.$$

Середнє арифметичне тривалості перехідного процесу $\bar{\tau}$ визначається наступним чином:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N}; \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

де τ_i – тривалість перехідного процесу; i – номер вимірювання; N – кількість вимірювань (перехідних процесів).

Період дискретизації визначається роботою персонального комп'ютера, процесор якого забезпечує високу точність часових інтервалів, тому абсолютна похибка ε_τ визначається лише випадковою складовою:

$$\varepsilon_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2}{N}}.$$

Робота САК вважається такою, що задовольняє вимогам технічного завдання J , якщо виконується наступна умова:

$$J = (|\bar{\sigma}| + \sigma_\tau \leq \sigma_{\max}) \wedge (\bar{\tau} + \varepsilon_\tau \leq \tau_{\max}); \quad \sigma_{\max} = 10\%; \tau_{\max} = 5 \text{ с},$$

де $\sigma_{\max}$ – максимально допустиме значення перерегулювання, $\tau_{\max}$ – максимально допустима тривалість перехідного процесу.

Випробування проводяться при ступінчастій зміні φ кількість повторень експерименту має складати $N \geq 5$, тривалість періоду знаходження САК в усталеному режимі має складати $\Delta t \geq 3 \text{ с}$;

Коефіцієнт Ст'юдента для обчислення похибки вимірювань тривалості перехідного процесу γ при довірчій ймовірності 0,99 та кількості вимірювань $N = 5$ складає $k_{\varepsilon, 0.99, 5-1} = 4,604$.

Початкова помилка керування має складати $\varphi \geq 20^\circ$.

4.3 Звітність

4.3.1 Результати випробувань оформляються протоколом (Додаток № 1).

4.3.2 Протокол випробувань затверджується головою комісії.

4.3.3 За результатами випробувань на підставі протоколу, складається акт.

4.3.4 Зауваження та пропозиції за результатами випробувань оформляються згідно з табл. 1.

Таблиця 1

Номер п. ПМ	Зауваження та пропозиції	Прийняте рішення
1	2	3

5 ПОРЯДОК І УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ МОРСЬКИХ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

5.1 Перед кожним видом випробувань проводити зовнішній огляд і перевірку працездатності зразка в нормальних кліматичних умовах.

5.2 Перевірка працездатності зразка виконується в наступному порядку:

5.2.1. виконати огляд дослідного макета АНПА РБ на цілісність основних її елементів та якість їх кріплення;

5.2.2 за допомогою мегомметра перевірити цілісність ізоляції кабель-троса (допускається опір не менше 200 МОм);

5.2.3 за допомогою мультиметра перевірити напругу живлення АНПА РБ (допускається напруга живлення 220 ± 20 В);

5.2.4 забезпечити нульові плавучість, крен та диферент у стані покою за допомогою динамометра та за показами блок сенсорів кутової орієнтації (допускаються надлишкова плавучість $\pm 2,0$ Н, крен та диферент $\pm 1,0^\circ$).

5.3 Нормальні кліматичні умови характеризуються поєднанням наступних параметрів атмосфери:

- температура від 15 до 35°C;
- відносна вологість повітря від 45% до 85%.

5.4 Випробування проводити при хвилюваннях водної поверхні до 1 бала за шкалою Бофорта та за відсутності течії.

5.5 При випробуваннях застосовувати стандартизовані засоби вимірювання і обладнання.

5.6 До випробувань допускається персонал, навчений роботі з апаратурою, випробувальним обладнанням.

5.7 Вимоги з безпеки в процесі випробувань повинні бути спрямовані на виключення травм обслуговуючого персоналу, а також з урахуванням вимог безпечної експлуатації надводних і підводних технічних засобів.

6 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

6.1 Перелік засобів вимірювальної техніки, що забезпечують необхідну точність вимірювань, повинен бути узгоджений з метрологічною службою підприємства-виконавця.

6.2 При проведенні випробувань застосовувати атестовані засоби вимірювань, що пройшли державну перевірку передбачені в методичі випробувань ПМ, які мають достатній термін до проведення чергової перевірки.

Дані про метрологічне забезпечення випробувань (Додаток № 2) зведено до табл. 2.

Таблиця 2.

№ з/п	Найменування приладу	Позначення документу на постачання	Кількість, шт.	Призначення приладу	Клас точності приладу
1	Вольтметр	Паспорт виробу	1	Вимірювання напруги	0,5
2	Мегомметр	Паспорт виробу	1	Вимірювання опору ізоляції	1
3	Динамометр	Паспорт виробу	1	Вимірювання зусилля	2
4	Блок сенсорів кутової орієнтації	Паспорт виробу	1	Вимірювання кутів Ейлера	2

7 ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

Показники якості регулятора курсу, що входить до САК рухом дослідного макета АНПА РБ визначаються на основі експериментальних значень залежності курсу φ від часу t в режимах ступінчастої зміни задачі керування.

7.1 Налаштувати регулятор курсу АНПА РБ в режимі зміни задачі керування за ступінчастим законом при маршовому русі АНПА РБ.

7.2 Оцінити регулятор курс АНПА РБ з відповідністю до технічного завдання.

7.3 Результати випробувань оформити у вигляді протоколу із застосуванням програмних засобів комп'ютерної графіки.

Курс АНПА РБ визначається за допомогою блоку сенсорів кутової орієнтації, що входить до системи бортової навігаційної.

8 МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ

8.1 Формування задачі керування

Експериментальні значення залежностей $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$ отримуються при русі АНПА РБ в режимі ступінчастої зміни задачі керування регулятором курсу.

Для визначення часу перехідного процесу τ необхідно задаємося значенням відхилення курсу, щоб частина перехідного процесу включала в себе режим насичення $\Delta\varphi > 10^\circ$.

Для проведення експерименту загальний час експерименту прийнято $T = 10$ с.

8.2 Порядок проведення морського натурного експерименту

8.2.1 Встановити початкові значення параметрів САК АНПА РБ:

- сигнал керування вертикальним рушієм $u_v = 0$;
- сигнал керування, що забезпечує однонаправлений упор маршових рушіїв статичний становить $p_{1\text{м}} = 0,5$;
- провести налаштування нечіткого регулятора курсу.

8.2.2 Встановити АНПА РБ в початкове положення:

- глибина занурення не менше 5 м;
- курс 0° .

8.2.3 Ввімкнути запис залежностей $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$ та активувати систему автоматичного керування рухом.

8.2.4 За допомогою кабель-буксиру змінити курс.

8.2.5 Дочекатись завершення перехідного процесу відновлення курсу 0° .

8.2.6 Деактивувати систему та вимкнути запис залежностей $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$.

8.2.6 При необхідності додаткового налаштування виконувати пп. 8.2.1 – 8.2.5, для покращення показників якості.

8.2.7 За допомогою програмно-апаратного забезпечення поста керування встановити задачу керування відповідно до поточного пункту програми випробувань.

8.2.8 Привести АНПА РБ до вихідного положення пункт 8.2.2.

8.2.9 Вимкнути запис залежностей $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$.

8.2.10 Активувати САК та подати на її вхід сформовану задачу керування. Чекати впродовж часу T .

8.2.11 Вимкнути запис залежностей $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$.

8.2.12 Повторити виконання пп. 8.2.8 – 8.2.11 $N - 1$ разів.

8.2.13 За отриманими перехідними процесами оцінити значення показників якості, які описано в п. 4.2 ПМ. Якщо отримані значення не відповідають умові технічного завдання J , провести корегування регулятора курсу та повторити пп. 8.2.7 – 8.2.12 порядку проведення натурного експерименту.

8.2.14 Коли буде виконано пункт 8.2.13 програми випробувань, завершити морський натурний експеримент.

Примітка. Допускається застосування кольорових фото- та відеозаписів для документування результатів випробувань.

Додаток № 1
Взірець протоколу морських натурних випробувань

ЗАТВЕРДЖУЮ

« _____ » _____ 20 ____ р.

М.П.

ПРОТОКОЛ МОРСЬКИХ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

(об'єкт випробувань)

(місце проведення випробувань)

(дата проведення випробувань)

Об'єкт випробувань:

Мета випробувань:

Обладнання та пристрої, використані для проведення випробувань:

Умови випробувань:

Результати випробувань:

Включити результати обчислення параметрів задачі керування, графічні залежності параметрів $\varphi(t)$, $\varphi_r(t)$, $u_r(t)$ та $u_l(t)$ та показники якості САК.

Висновки:

Голова комісії

Члени комісії

Додаток Б

Порядок проведення морських дослідницьких випробувань діючого макету радіобуя проекту «Арго-Буй»

Б.1 Загальна послідовність проведення морських дослідницьких випробувань макету радіобуя проекту «Арго-Буй»

1. Підготовка та монтаж пристроїв і системи реєстрації сигналів.
2. Центрування макета РБ у воді. Визначення головних статичних характеристик макета РБ (вага, положення центру ваги, центра величини та ін.).
3. Дослідження статичної та динамічної остійності макета РБ.
4. Дослідження характеристик КБ у квазістаціонарному режимі буксирования.
5. Випробування макету РБ у квазістаціонарному режимі буксирования у складі: АНПА-буксирувальник, КБ, повномасштабний макет РБ та його ЗКВ (макет щогли зовнішньої антени), надводне судно забезпечення (СЗ).
6. Обробка та аналіз результатів морських дослідницьких випробувань макету РБ.

Б.2 Методика морських дослідницьких випробувань АНПА-РБ

Б.2.1 Дослідження статичної та динамічної остійності РБ

Для проведення експерименту необхідно підготувати схему досліджень згідно рис. Б.1.

Вимірювання фізичних величин (кутів, сил) проводити за допомогою спеціально розробленої системи телеметрії та динамометру при вільно плаваючому макеті РБ, із встановленим ЗКВ (макетом щогли зовнішньої антени).

За результатами експерименту виконується розрахунок характеристик статичної та динамічної остійності макету РБ.

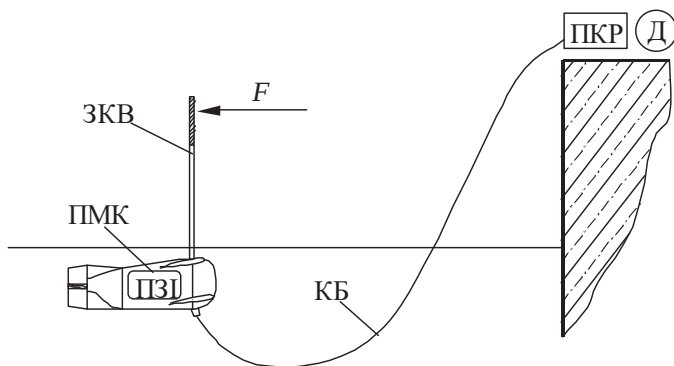


Рисунок Б.1 – Схема експериментального вивчення статичної та динамічної остійності макету РБ:

ЗКВ – зовнішній корисний вантаж (щогла зовнішньої антени);
 F – зовнішня кренуюча сила; ПМК – приладовий міцний корпус;
 ПЗІ – пристрій збору інформації (інклінометри системи телеметрії);
 КБ – кабель-буксир; ПКР – пост контролю і реєстрації експериментальних даних; Д – динамометр

Б.2.2 Дослідження характеристик КБ у квазістаціонарному режимі буксирування

Для проведення випробування необхідно підготувати схему експерименту, згідно рис. Б.2.

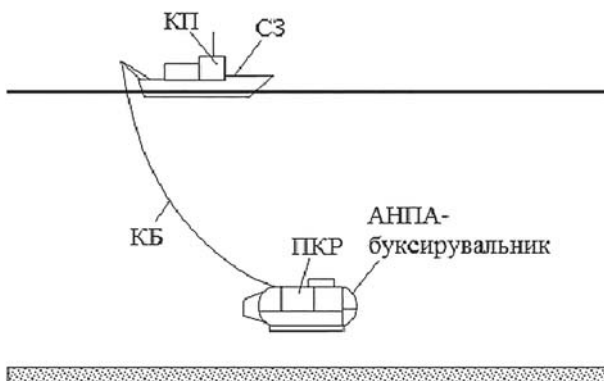


Рисунок Б.2 – Схема дослідження характеристик КБ у квазістаціонарному режимі буксирування: СЗ – судно забезпечення; КП – командний пункт; ПКР – пост контролю і реєстрації експериментальних даних; КБ – кабель-буксир

Для виконання умов квазістаціонарного буксирування КБ потрібно забезпечити рух з однаковими швидкостями АНПА-буксирувальника і судна забезпечення. Глибину ходу АНПА необхідно встановлювати за допомогою його штатного датчика глибини.

Кут нахилу ходового (верхнього) кінця КБ і зусилля в ньому необхідно вимірювати датчиками системи телеметрії та фіксувати у ПЕОМ, яку розташовано на СЗ.

Контролювати можливе виникнення поперечних коливань КБ у потоці води необхідно за допомогою системи телеметрії.

Використовуючи результати експерименту, визначити чисельні значення гідродинамічних коефіцієнтів КБ.

Б.2.3 Випробування РБ у квазістаціонарному режимі буксирування

Випробування виконуються з залученням обладнання у складі: АНПА-буксирувальник, КБ, макет РБ та його ЗКВ, судно забезпечення СЗ.

Для експериментального випробування АНПА з макетом РБ у квазістаціонарному режимі буксирування розгортається схема досліджень, згідно рис. Б.3.

Просторовий стан макету РБ, кут нахилу ходового кінця КБ і зусилля у ньому вимірювати датчиками системи телеметрії та фіксувати у ПЕОМ, яку розташовано у ПКР.

Задану швидкість квазістаціонарного буксирування слід встановлювати навігаційними засобами АНПА-буксирувальника. Глибину ходу АНПА-буксирувальника необхідно встановлювати за допомогою його штатного датчика глибини. Глибину підповерхневого буксирування макету РБ необхідно визначати візуально за розміткою, яка попередньо нанести на ЗКВ (мачту).

За даними морських дослідницьких випробувань макету РБ визначити очікувані експлуатаційні характеристики системи:

- амплітуду, швидкість та прискорення крену та диференту,

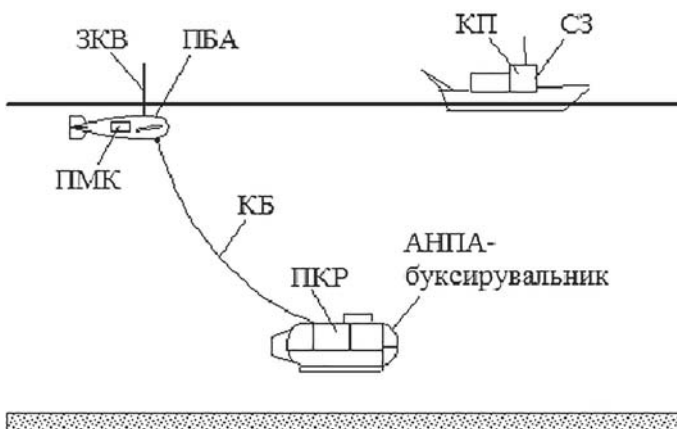


Рисунок Б.3 – Схема випробувань макету РБ у квазістаціонарному режимі буксирування: СЗ – судно забезпечення;

КП – командний пункт; СБ – судно забезпечення;

ПКР – пост контролю і реєстрації експериментальних даних;

КБ – кабель-буксир; РБ – макет РБ; ПМК – приладовий міцний корпус;

ЗКВ – зовнішній корисний вантаж (макет щогли)

- спроможність виходу РБ у режим приповерхневого буксирування у заданому діапазоні швидкостей руху АНПА-буксирувальника;
- ступінь поздовжньої, поперечної та маятникової стійкості руху системи та відсутність коливальних рухів апарату за таких умов;
- характеристики руху РБ в умовах приповерхневого буксирування (відсутність чи наявність збурень водної поверхні), у тому числі і при наявності морського хвилювання (додаткові сили та моменти від зовнішніх збурень) та при його заглибленні зі встановленим ЗКВ (виникнення при цьому додаткового диференту апарату при заглибленні, завдяки додатковим силам опору).

Наукове видання

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ
АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ
ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ
З РАДІОБУЄМ**

Монографія

*За редакцією доктора технічних наук,
професора В. С. Блінцова*

Формат 60×84¹/₁₆. Ум. друк. арк. 11,4. Тираж 300 пр. Зам. № 524-683.

ВИДАВЕЦЬ І ВИГОТОВЛЮВАЧ
Товариство з обмеженою відповідальністю фірма «Іліон».
54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1506 від 25.09.2003 р.