

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

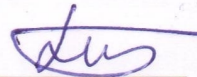
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 16 » 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханіка та електроенергетика

(назва освітньої програми)

на тему: Дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування

Виконав: студент IV курсу, групи 4371

Нужний Іван Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н., доц. Васильєв О.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль доц. каф. автоматики, к.т.н., доц. Васильєв О.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

м. Миколаїв – 2025 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електромеханіка та електроенергетика»

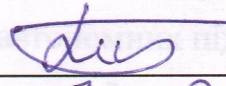
ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, к.т.н.

доцент

І.С. Білюк

2025_ року


« 7 » 02

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

гр.4371

Нужний Іван Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування»

керівник роботи Васильєв Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «23» квітня 2025 р.

№ УЧ -343.

2. Строк подання студентом роботи 16 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Рушійно-рульовий комплекс (РРК) автономного ненаселеного підводного апарату; Потужність маршових рушіїв 3·кВт; напруга живлення 24 В; швидкість руху не більше 5/7,5 вузлів/м/с

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Призначення та сфера застосування виробу, що розробляється. 2 Постановка задачі дослідження. 3 Опис та обґрунтування прийнятих рішень. 4 Розрахунки, що підтверджують працездатність. 5. Охорона навколишнього середовища

5. Перелік графічного матеріалу 1. Дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування 2. Актуальність, мета і задачі роботи 3. ПТК для гуманітарного розмінування 4. Технічні характеристики комплексу АНПА Гр.Мк1 5. Система автоматичного керування 6. – 8. Результати дослідження 9. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Васильєв О.Г., к.т.н., доцент	05.05.2025	10.06.2025

7. Дата видачі завдання «04» березня 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення та сфера застосування виробу, що розробляється	14.03.2025	
2	Постановка задачі дослідження	05.04.2025	
3	Опис та обґрунтування прийнятих рішень	05.05.2025	
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність	03.06.2025	
5	Охорона навколишнього середовища	10.06.2025	

Студент

(підпис)

Нужний І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Васильєв О.Г.

(прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Васильєв О.Г., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «04» березня 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення та сфера застосування виробу, що розробляється	14.03.2025	
2	Постановка задачі дослідження	05.04.2025	
3	Опис та обґрунтування прийнятих рішень	05.05.2025	
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність	03.06.2025	
5	Охорона навколишнього середовища	10.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Нужний І.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник
роботи _____
(підпис)

Васильєв О.Г.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 106 сторінок: 97 сторінок пояснювальної записки, 5 розділів, 10 таблиць, 34 рисунків, 71 літературних джерел, 1 додаток на 9 сторінках

Ключові слова: математична модель, засоби морської підводної робототехніки робот, система керування, гуманітарне розмінування.

Мета роботи – дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування.

В розділі 1 наведено коротку характеристику області та умов застосування засоби морської підводної робототехніки робот – автономних підводних апаратів в цілому та обґрунтовано можливість застосування їх до виконання задач гуманітарного розмінування для прибережної зони українського мілководного шельфу (до 30 м) Азово-Чорноморського басейну. Проведено аналіз та надані базові характеристики автономних підводних апаратів, що аналогів є виготовляються світовими лідерами, в тому числі й з радіобуєм.

В розділі 2 розглянута структура та основні технічні характеристики автономного ненаселеного підводного апарата для гуманітарного розмінування (АНПА-ГР.Мr1), наведено опис його систем автоматичного керування та навігації, як основних елементів автоматизованої системи керування рухом апарату. Визначено основні завдання дослідження математичної моделі системи керування рухом апарату.

В розділі 3 приведено опис математичної моделі руху твердого тіла в рідині та розроблено схема ПД-регулятора, що враховує структура та характеристики системи АНПА–кабель–буксир–радіобуй як об'єкта управління.

В розділі 4 наведено результати дослідження математичної моделі системи керування рухом апарату на основі ПІ- та ПД-регулятора. Вибрані параметри налагоджування регуляторів, які забезпечили задані параметри перехідних процесів.

В розділі 5 розглянуті питання охорони праці.

Додаток містить 9 слайдів мультимедійної презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ	7
1.1 Коротка характеристику області та умов застосування автономних підводних апаратів з радіобуєм.....	7
1.2 Загальна характеристика автономних підводних апаратів з радіобуєм	18
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
2.1 Технічні характеристики комплексу АНПА Гр.Мк1	21
2.2 Опис конструкції комплексу АНПА Гр.Мк1	23
2.3 Опис системи автоматизованого керування	27
2.4 Опис системи навігації.....	29
2.5 Постановка задачі дослідження.....	33
3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ	34
3.1 Опис математичної моделі руху твердого тіла	34
3.2 Опис алгоритму Циглера-Нікольса.....	36
3.3 Опис модернізації класичного ПІД регулятора.....	38
3.4 Моделювання руху АНПА в середовищі Matlab.....	40
3.5 Синтез регуляторів прямолінійного руху	42
3.6 Синтез регуляторів утримання курсу	52
4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТ	60
4.1 Розрахунок гідродинамічного опору системи АНПА–КБ–РБ	60
4.2 Розрахунок параметрів та вибір електродвигунів приводів маршових рушіїв	66
4.3 Розрахунок моделі руху системи АНПА–РБ	66

5	ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	81
5.1	Охорона праці користувачів комп'ютерів.....	81
5.2	Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при розробці й експлуатації системи технічного захисту	82
5.3	Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого приміщення.....	83
	ВИСНОВКИ	91
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	92
	ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація	98

ВСТУП

Засоби морської робототехніки (ЗМР) широко застосовуються більшістю провідних морських країн світу. Головними виробниками ЗМР є наступні провідні світові компанії: Lockheed Martin, Teledyne Technologies, Oceanering International, Oceanserver Technology, Boeing (всі – США); Kongsberg Gruppen (Норвегія); Saab AB (Швеція); Subsea 7 (Люксембург); Шеньянський інститут автоматизації (КНР). До основних напрямків застосування ЗМР у провідних морських країнах світу відносяться: природоохоронні задачі; задачі промислового будівництва на шельфі; аварійнорятувальні роботи; задачі з пошуку та видобування сировинних та мінеральних ресурсів; задачі з вивчення Світового океану; підводна археологія.

Автономні підводні апарати дедалі частіше застосовуються для виконання задач у складних та небезпечних умовах, зокрема у сфері гуманітарного розмінування водних акваторій. Одним із актуальних напрямів є дослідження систем автоматизованого керування такими апаратами з урахуванням специфіки умов експлуатації – обмеженої видимості, складної гідродинамічної обстановки, потреби в точному позиціюванні та стабільному зв'язку. Для підвищення ефективності роботи апарату до його складу вводиться радіобуй, який виконує функції передачі телеметричної інформації, корекції положення та комунікації з оператором .

У зв'язку з цим постає потреба в дослідженні динаміки руху підводного апарата, розробці адекватної математичної моделі та синтезі системи автоматизованого керування, що забезпечує стійкість і точність руху в складних умовах водного середовища.

Метою даної роботи є дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

1. Провести аналіз сучасних засобів підводної робототехніки, що застосовуються для гуманітарного розмінування.
2. Визначити специфічні умови експлуатації АНПА з радіобуєм в акваторіях України.
3. Побудувати математичну модель руху автономного підводного апарата.
4. Виконати моделювання роботи системи керування в середовищі MATLAB/Simulink.
5. Провести аналіз ефективності регуляторів та оптимізувати їх параметри.

Об'єктом дослідження є процес управління складними підводними об'єктами в просторовому полі.

Предмет дослідження – методика розробки системи автоматичної стабілізації руху по заданій траєкторії та просторового положення автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм.

Методи дослідження: Під час проведення досліджень використовувалися базові положення методів математичного моделювання, статистичного аналізу, абстрагування і формалізації. Застосовувалися методи експертного аналізу.

Робота виконана в рамках з ДКР 2359 «Розробка конструкторської документації на створення засобів підводної робототехніки» (ДСК).

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ

1.1 Коротка характеристику області та умов застосування автономних підводних апаратів з радіобуєм

Автономний ненаселений підводний апарат (АНПА) широко використовуються для підготовки карт морського дна до створення підводної нафтогазової інфраструктури. Категорії ринку АНПА за ознакою застосування – це оборонні, комерційні, наукові дослідження та інші. До 2030 року найшвидше зростання буде спостерігатися в комерційній категорії, оскільки АНПА широко використовуються для картографування морського дна, глибинних досліджень, будівництва трубопроводів, морського буріння, кабельної прокладки та багатьох інших комерційних цілей. Особливу актуальність для України, мають розробки АНПА, які призначені для гуманітарного розмінування акваторій – знешкодження морських мін та затонувлих боєприпасів. Крім того, актуальною є також розробка прив'язних та буксируваних ненаселених підводних апаратів-роботів як окремого виду ЗМР, ефективних при виконанні особливо складних місій. Попередній аналіз проблеми створення таких АНПА свідчить, що для їх повномасштабного виробництва в Україні необхідно розв'язати низку наступних наукових завдань:

- удосконалення теорії проектування АНПА на основі використання останніх досягнень у галузях гідродинаміки, матеріалознавства, енергетики, електромеханіки, електроніки, інформатики та проектного менеджменту;
- удосконалення теорії автоматичного керування АНПА на основі сучасних здобутків теорії автоматичного керування та електроніки;
- утворення промислових виробництв для серійного будівництва АНПА;

– організація підготовки фахівців для напрямках проектування, будівництва та експлуатації засобів морської робототехніки.

Актуальність розробки, створення і впровадження ЗМР в Україні підтверджується низкою міжнародних документів та рішеннями Президента й Уряду України, а саме: проголошенням у 2017 р. Генеральною Асамблеєю ООН Десятиліття наук про океан в інтересах стійкого розвитку (2021-2030 гг.), спрямованого на стимулювання науки про Світовий океан і накопичення знань із метою зупинення тенденції до погіршення стану океанської екосистеми й стимулювання нових можливостей для її збереження та стійкого розвитку [1]; указами Президента України та постановами Уряду України щодо необхідності розвитку роботизованих морських технологій [2]; наявністю у складі МОН України науководослідного судна «Ноосфера», призначеного для дослідження Світового океану і, зокрема, Антарктиди [4]; підготовкою в НУК вітчизняних і зарубіжних фахівців за напрямком “Sea Robotics” згідно одному зі стратегічних напрямків розвитку вищої освіти в Україні [5]. Крім того, територіальні води України сьогодні містять значну кількість морської мінної зброї, знешкодження якої необхідно безлюдними (роботизованими) технологіями.

1.1.1 Аналіз задач програми гуманітарного розмінування для водних акваторій України

Розробка підводних апаратів різного типу в останній час набула високої актуальності в зв'язку з вторгненням російських військ в Україну. Використання автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) дасть більшу ефективність та безпеку при виконанні задач Збройних сил України, МНС та інших спеціальних служб. В залежності від поставленої задачі, конструкції підводних апаратів та їх націпне обладнання може змінюватись. Гуманітарне розмінування – це один з основних компонентів протимінної діяльності. У широкому розумінні воно включає дослідження, картографування та маркування мінних полів, а також фактичне розмінування місцевості. На

територіях України знаходиться багато вибухонебезпечні предмети, до них відносять боєприпаси, вибухові речовини, піротехнічні засоби, саморобні вибухові пристрої та інші предмети, які можуть бути небезпечними при виявленні. Розмінування України є важливим питанням на сьогодні та залишиться таким на десятки років після нашої перемоги. Точні терміни розмінування всієї території України визначатимуться вже після закінчення воєнних дій та повної деокупації всіх територій суверенної України у кордонах 1991 року.

1.1.1.1 Основні задачі програми гуманітарного розмінування водних акваторій:

1. Картографування забруднених територій

Створення цифрових карт акваторій з відмітками потенційно небезпечних ділянок. Постійне оновлення даних за результатами обстежень.

2. Виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП)

Проведення обстеження дна водних об'єктів (річок, озер, морських узбереж тощо) для виявлення мін, боєприпасів, саморобних вибухових пристроїв. Використання гідролокаторів, автономних підводних апаратів, магнітометрів тощо.

3. Ідентифікація та класифікація ВНП

Визначення типу та стану виявленого об'єкта. Розрізнення бойових предметів від хибних цілей (наприклад, металобрухту).

4. Безпечне вилучення або знешкодження ВНП

Планування та виконання операцій із знешкодження (in-situ) або підняття та утилізації виявлених об'єктів. Дотримання технік підводного розмінування, що гарантують безпеку персоналу та мінімальний вплив на довкілля.

5. Моніторинг і повторна перевірка

Проведення регулярного моніторингу очищених ділянок для запобігання повторній небезпеці. Використання автоматизованих систем спостереження для тривалого контролю.

6. Забезпечення інформаційної підтримки та звітності

Ведення обліку очищених територій та виявлених ВНП. Передача даних до міжнародних організацій, урядових структур та гуманітарних місій.

7. Захист довкілля

Мінімізація шкідливого впливу на морські екосистеми під час проведення розмінування. Забезпечення екологічної оцінки перед і після операцій.

8. Підготовка фахівців та інформування населення

Навчання операторів систем розмінування, водолазів та технічних спеціалістів. Проведення інформаційних кампаній серед населення щодо ризиків, пов'язаних із ВНП у водоймах.

1.1.1.2 Особливості умов розмінування водних територій України

а) Типи водних об'єктів:

- морські акваторії (Чорне та Азовське моря) – великі площі з різною глибиною, течіями, можливістю мінування судноплавних маршрутів;
- річки та канали (Дніпро, Південний Буг, Сіверський Донець тощо) – особливості течії, мілководдя, водосховища;
- озера та ставки – обмежений простір, замуленість, заростання рослинністю.

б) Фізичні та екологічні фактори:

- замулення та погана видимість під водою значно ускладнюють виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП);
- зміни глибини та підводні течії впливають на стабільність розташування мін та уламків;
- наявність органічних матеріалів (водоростей, мулу) може маскувати або деформувати ВНП;
- температурний режим – низька температура води в деяких регіонах ускладнює проведення робіт, особливо в зимовий період.

в) Типи загроз:

- морські та річкові міни (контактні, магнітні, акустичні);
- нерозірвані боєприпаси (НБО), включно з артилерійськими снарядами, авіабомбами, глибинними бомбами;

- імпровізовані вибухові пристрої – можуть бути встановлені під водою або на мілководді.

г) Технічні складнощі:

- обмежене використання стандартних наземних методів розмінування;
- потреба у спеціалізованому обладнанні – підводні дрони, гідролокатори, дистанційно керовані апарати (ROV), магнітометри, сонари;

- складність у навігації та позиціонуванні техніки під водою;

- організаційні та правові аспекти;

- міжнародне право регламентує розмінування морських акваторій – особливо у прикордонних зонах;

- залучення військово-морських сил, спеціалізованих підрозділів ДСНС, іноземних партнерів (НАТО, ООН, Норвезький народний допомоговий корпус тощо);

- необхідність екологічної експертизи перед початком робіт.

д) Загроза для цивільного населення та судноплавства:

- підвищена небезпека для рибалок, плавзасобів, туристичної інфраструктури;

- ускладнення навігації на судноплавних маршрутах, зокрема на Дніпрі й у морських портах.

е) Актуальність через війну:

- з 2022 року внаслідок збройної агресії Росії різко зросла кількість мінувань морських і річкових територій;

- Чорне море частково заблоковане мінами, що загрожують цивільним суднам і впливають на глобальну торгівлю зерном.

1.1.2 Огляд засобів підводної робототехніки, що використовуються для задач розмінування підводних акваторій

Підводна робототехніка відіграє ключову роль у сучасному гуманітарному розмінуванні водних акваторій. Використання безпілотних систем дозволяє виконувати пошук, ідентифікацію та знешкодження вибухонебезпечних предметів (ВНП) з мінімальним ризиком для людей, особливо в складних або небезпечних умовах.

1.1.2.1 Основні типи підводної робототехніки для розмінування:

а) *автономні підводні апарати* (AUV – Autonomous Underwater Vehicles) (див. рис. 1.1)



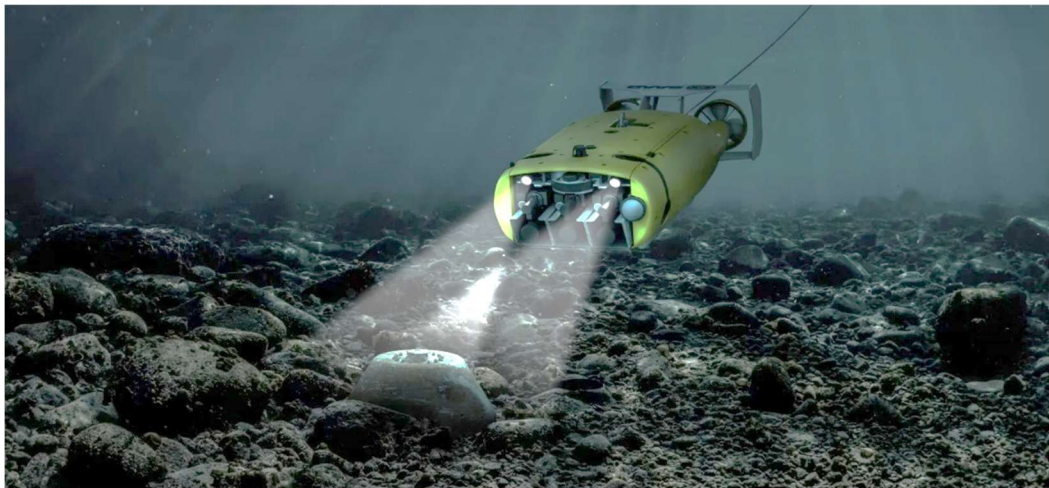
Рисунок 1.1 – Приклад серії АНПА для виявлення вибухонебезпечних підводних об'єктів фірми BlueZone Group (Австралія)

1) призначення – Автономне сканування дна, створення карт загроз, виявлення потенційно небезпечних об'єктів.

2) особливості:

- працюють без кабельного з'єднання з базою;
- оснащені гідролокаторами бокового огляду (side-scan sonar), мультипроменевими ехолотами, магнітометрами;
- можуть працювати на глибинах до 1000 м і більше;
- використовуються на етапі розвідки та картографування.

б) *дистанційно керовані апарати* (ROV – Remotely Operated Vehicles)
(див. рис. 1.2)



а)



б)

Рисунок 1.2 – Прив'язний підводний апарати для розмінування:

- а) Double Eagle MuMNS (фірма SAAB, Швеція),
- б) PLUTO PLUS (фірма GAYMARINE SRL, Італія)

1) призначення – Ідентифікація, детальна інспекція та знешкодження ВНП.

2) особливості:

- працюють з кабелем від судна або платформи;
- оснащені відеокамерами, маніпуляторами, інструментами для знищення ВНП;
- можуть керуватися оператором у реальному часі.

в) *гібридні системи* (Hybrid ROV/AUV) (див. рис. 1.3)



Рисунок 1.3 – AUV/ROV Freedom призначений для довгострокових глибоководних досліджень (фірма Oceaneering International, Inc., США)

1) призначення – поєднують автономні можливості з можливістю ручного управління (використовується кабель-трос, що від'єднується за командою оператора).

2) переваги:

- гнучкість у застосуванні: автономна розвідка + ручне втручання для складних операцій;
- добре підходять для глибоководного або мілководного розмінування.

г) *поверхневі безпілотні платформи* (USV – Unmanned Surface Vehicles) (див. рис. 1.4).

1) призначення – транспорт AUV/ROV, ретрансляція сигналу, платформи для керування та зв'язку.

2) Особливості:

- можуть діяти автономно або під управлінням;
- зазвичай оснащені кранами, кабельними барабанами, радіобоями.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Приповерхневі безпілотні платформи (фірма BlueZone Group, Австралія):

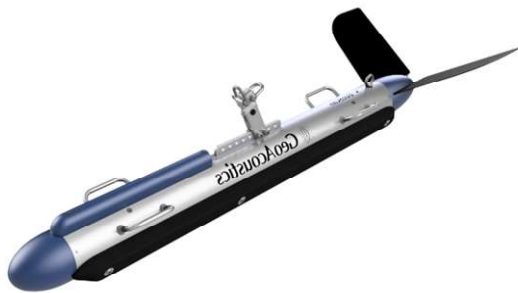
а) Z-Boat for Remote Hydrographic Survey Applications;

б) Teledyne OceanScience Z-Boat 1250

д) *додаткові технології:*

- гідролокатори бокового огляду (SSS) – для виявлення форм та аномалій на дні (див. рис. 1.5);
- магнітометри – виявлення металевих об'єктів (див. рис. 1.6);
- AI та обробка даних – автоматична класифікація підводних об'єктів;

– GPS + акустична навігація (USBL/DVL) – забезпечують точне позиціонування апаратів.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Варіанти гідролокатори бокового огляду:

а) GeoScan 2491 (GeoAcoustics Ltd, Велика Британія);

б) 4205 Multipurpose Survey System (США)



а)



б)

Рисунок 1.6 – Морські магнітометр Marine Magnetics Inc. (США):

а) Мініатюрний морський магнітометр Explorer;

б) Морской магнитометр SeaSpy

1.1.3 Особливості застосування засобів підводної робототехніки, що використовуються для задач розмінування, на українських водоймах

Застосування підводної робототехніки для розмінування на території України має низку специфічних особливостей, зумовлених географічними, гідрологічними, технічними та воєнно-політичними факторами. Нижче наведено основні особливості:

а) складні гідрологічні умови

- мілководдя та замулене дно – багато українських річок і водойм (Дніпро, Південний Буг, Сіверський Донець) мають невелику глибину та велику кількість донних відкладень, що ускладнює роботу гідролокаторів і візуальну ідентифікацію ВНП.

- слабка видимість – вода часто каламутна, що обмежує ефективність камер ROV.

- сильна течія (особливо в річках) – створює труднощі для стабільного функціонування дистанційно керованих апаратів та автономних систем.

б) розмаїття типів водойм

- морські акваторії – прибережні зони Чорного та Азовського морів, особливо в районах портів (Одеса, Чорноморськ, Миколаїв), містять велику кількість мін, які могли бути встановлені як оборонний захід.

- річкові системи та водосховища – часто використовувалися як маршрути транспортування або місця зберігання техніки, що збільшує ймовірність наявності ВНП.

в) Обмеженість ресурсів та інфраструктури

- дефіцит сучасного обладнання – не всі українські установи мають доступ до сучасних AUV чи ROV, що обмежує обсяги та глибину розмінування.

- залежність від міжнародної допомоги – більшість передових систем надаються в рамках допомоги НАТО, ЄС або приватних донорів (наприклад, SeaFox, REMUS від США чи Великої Британії).

- недостатня кількість навчених операторів – необхідність системного навчання персоналу для керування складними підводними платформами.

г) Військова небезпека та змінні ризики

- ризик повторного мінування – деякі райони можуть залишатися під загрозою через триваючі бойові дії.

- недостатність точних карт мінування – відсутність повної документації або карти встановлення мін у водоймах ускладнює планування операцій.

д) Необхідність адаптації техніки

- модифікація ROV/AUV для роботи в умовах мілководдя та мулистого дна;
- використання гібридних або компактних систем, які краще пристосовані до вузьких або зарослих водойм;
- оснащення радіобуями або ретрансляторами, щоб забезпечити зв'язок у районах без сталого супутникового покриття.

е) Екологічні ризики

- роботи повинні враховувати ризики для фауни та флори (особливо в заповідних зонах або річках з багатим біорізноманіттям);
- уникнення порушення природного середовища при роботі техніки.

1.2 Загальна характеристика автономних підводних апаратів з радіобуєм

Автономний підводний апарат з радіобуєм (АПА з РБ) є високотехнологічним безпілотним засобом, призначеним для виконання задач у підводному середовищі без постійного управління оператором. Поєднання автономного режиму роботи з можливістю періодичного зв'язку через радіобуй робить цей тип апарату надзвичайно ефективним для виконання завдань у складних або віддалених умовах.

а) основне призначення:

- підводне розмінування (виявлення вибухонебезпечних предметів);
- гідрографічна та океанографічна розвідка;
- екологічний моніторинг;
- військове спостереження та розвідка;
- інспекція підводної інфраструктури.

б) основні компоненти :

1) автономний підводний апарат (AUV):

- сенсори: гідролокатор бокового огляду, ехолот, камери, магнітометр, іноді хімічні або біологічні датчики;

- системи навігації: інерційна навігація, глибиноміри, доплерівські вимірювачі швидкості (DVL), GPS (через радіобуй);
- програмне забезпечення: планування маршруту, автономна адаптація до умов;
- живлення: акумуляторні батареї (літій-іонні або срібно-цинкові), що забезпечують кілька годин або днів автономної роботи.

2) *радіобуй* (РБ):

- призначення – забезпечення зв'язку між підводним апаратом та оператором або базовою станцією;
 - функції:
 - a. підйом на поверхню через певний інтервал часу;
 - b. передача накопичених даних (наприклад, телеметрії або картографічної інформації);
 - c. отримання нових команд;
 - d. фіксація GPS-координат для корекції навігації;
 - засоби зв'язку: супутниковий канал (Iridium, Inmarsat), радіоканал, GSM/4G/5G (у прибережній зоні).
- в) переваги АПА з радіобуєм:
- автономність: не потребує постійного оператора чи кабелю;
 - безпечність: зменшує ризик для людей при розмінуванні або в зоні бойових дій;
 - масштабованість: можливість одночасного застосування кількох апаратів;
 - можливість роботи в складних або віддалених районах, де немає постійного зв'язку;
 - економічна ефективність: менші витрати порівняно з екіпажними суднами та водолазами.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному випадку буде розглядатися автономний ненаселений підводний апарат (АНПА) призначений для проведення комплексу робіт по обстеженню морських прибережних акваторій, штучних та природніх водойм (водосховища, котловани, озера та інше), а також русел річок, заток та лиманів, на предмет виявлення та ідентифікації вибухонебезпечних об'єктів в рамках гуманітарного розмінування (ГР).

АНПА входить до складу підводно-технічного комплексу (ПТК) (див. рис. 2.1). До складу ПТК входять:

- АНПА;
- кабель-буксир;
- радіобуй;
- судно забезпечення.

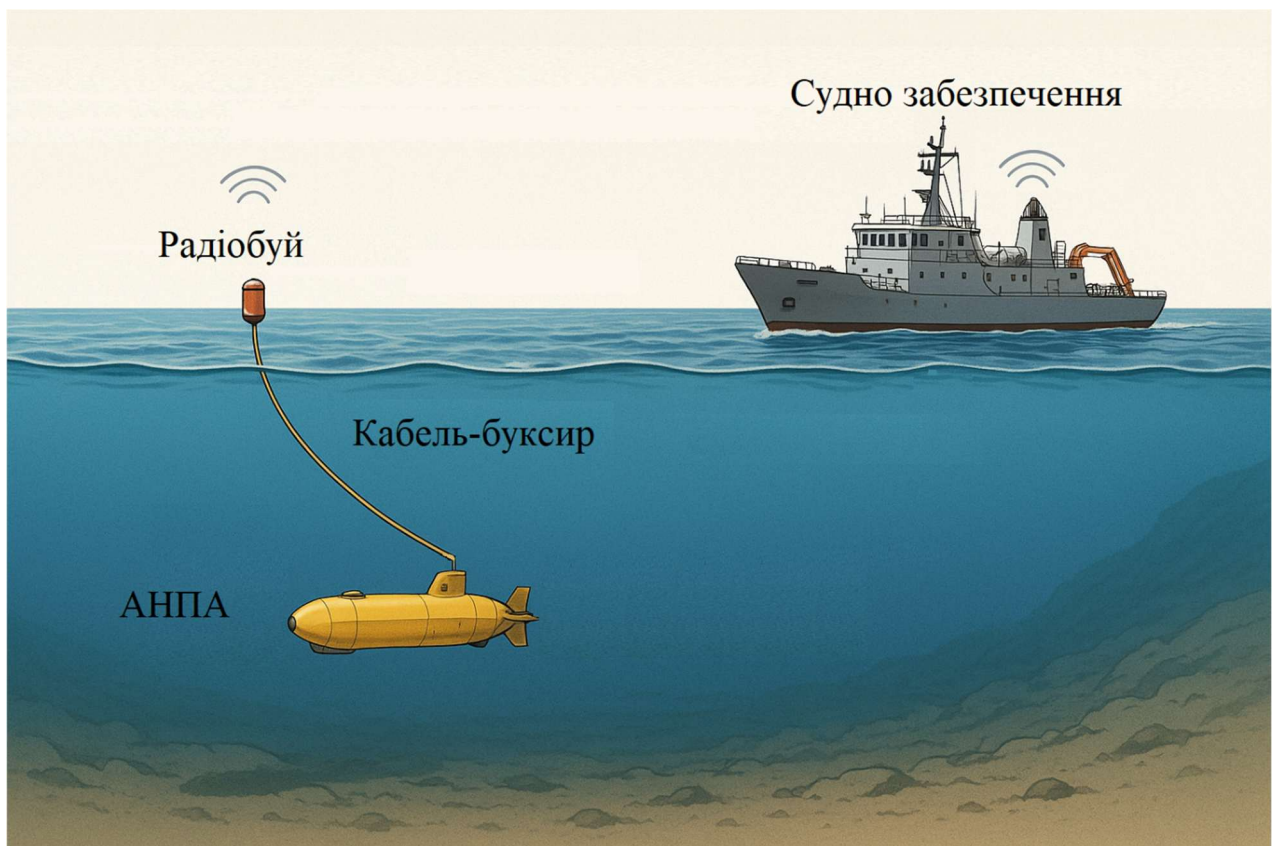


Рисунок 2.1 – ПТК для гуманітарного розмінування

2.1 Технічні характеристики комплексу АНПА Гр.Мк1

2.1.1 Загальні технічні характеристики

Регіон роботи	мілководний морський шельф, природні та штучні водойми
Робоча глибина, не більше, м	30
Рівень хитавиці, не більше, балів	3
Дальність радіозв'язку, не більше, м:	
– канал WiFi	400
– канал супутникового зв'язку	не обмежений
Швидкість руху, не більше, вузлів / м/с:	
– в режимі обстеження	5 / 2,5
– в режимі ідентифікації	2 / 1,0
Орієнтовний час роботи, не менше, год	3
Габарити(В×Ш×Д), не більше, мм:	
– АНПА (базова комплектація)	800×1410×2500
– АНПА з додатковим модулем	800×1410×3100
Вага, не більше, кг:	
– АНПА (базова комплектація)	700
– АНПА з додатковим модулем	1000

2.1.2 Технічні характеристики АНПА

2.1.2.1 Енергосистема

Напруга в мережі електроживлення:

– системи керування, В	12
– рушійно-кермовий комплекс, В	24

Джерело електроенергії акумуляторна батарея

Тип базової АКБ (БАКБ) LFP-Smart 12,8/330

Виробник	Victron Energy Lithium Battery Smart
Номінальна напруга БАКБ, В	12,8
Номінальна ємність БАКБ, А×год	330
Розміри БАКБ (В×Ш×Г), не більше, мм	265×359×206
Розміри енергоконтейнера (В×Ш×Г), мм	630×515×305
Загальна ємність енергосистеми, А×год	
– АНПА (базова комплектація)	1980
– АНПА з додатковим модулем	2970

2.1.2.2 Рушійно-рульовий комплекс (РРК)

Склад РРК:

– маршові рушії, шт. / тип	4 / POD 3.0
– лагові рушії, шт. / тип	2×2 / POD 0.5
– вертикальні рушії, шт. / тип	1×2 / POD 0.5

2.1.2.3 Для маршових рушіїв використано приводи обвідного типу POD 3.0 (фірма-виробник Rim Drive Technology, Нідерланди).

Основні ТТХ обвідного типу POD 3.0:

– Потужність, номінальна, кВт	3.0
– Напруга живлення, номінальна, В	24
– Довжина, не більше, мм	150
– Ширина, не більше, мм	191
– Вага, не більше, кг	4,0
– Статична тяга,	31
– Контролер двигуна в комплекті	Так

2.1.2.4 Приводи підрулюючих пристроїв.

Для підрулюючих пристроїв лагового та вертикального руху використані приводи обвідного типу POD 0,5 (фірма-виробник Rim Drive Technology, Нідерланди).

- Основні ТТХ обвідного типу POD 3.0:
- Потужність, номінальна, кВт 0,5
- Напруга живлення, номінальна, В 24
- Довжина, не більше, мм 114
- Ширина, не більше, мм 108
- Вага, не більше, кг 3,0
- Статична тяга, 7
- Контролер двигуна в комплекті Так

2.2 Опис конструкції комплексу АНПА Гр.Мк1

2.2.1 Опис конструкції підводного апаратау АНПА Гр.Мк1

АНПА є торпедоподібним тілом з еліпсоїдом в перетині мідельшпангоуту (див. рис.2.2).

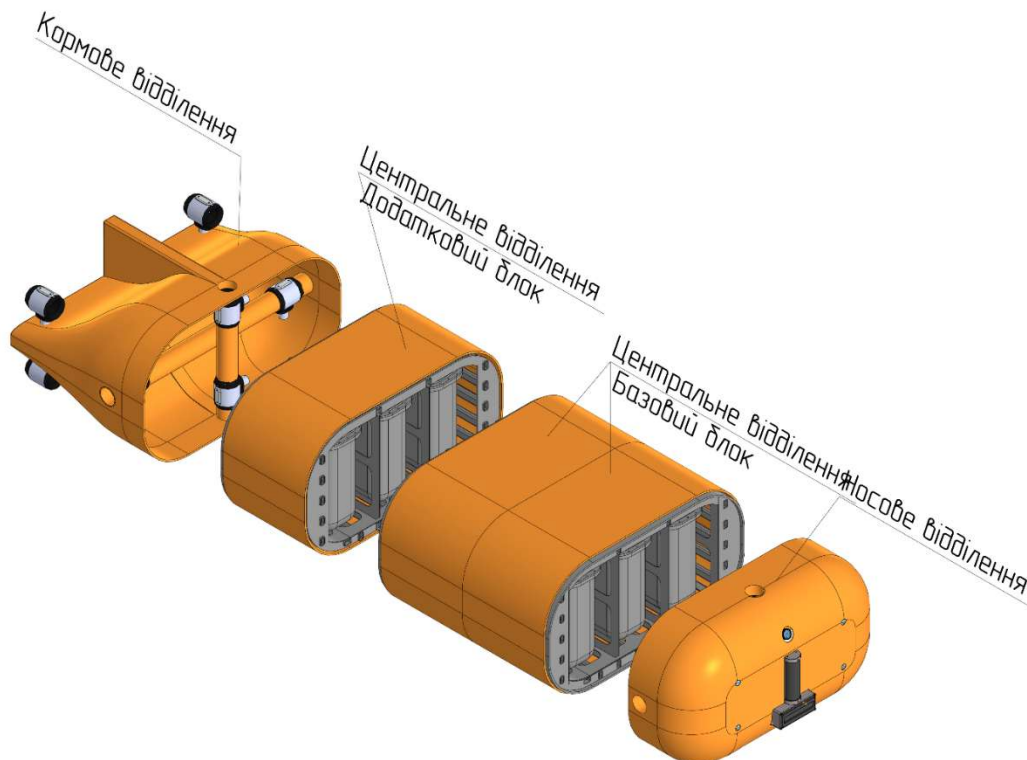


Рисунок 2.2 – Склад АНПА ГР

Тіло АНПА розділене на три частини (відділення):

- носове відділення;
- центральне відділення;
- кормове відділення.

2.2.1.1 Носове відділення призначене для розміщення (див. рис. 2.3):

- навігаційне обладнання;
- системи автоматизованого керування;
- носового лагового підрулюючого пристрою;
- носового вертикального підрулюючого пристрою;
- корисного вантажу.

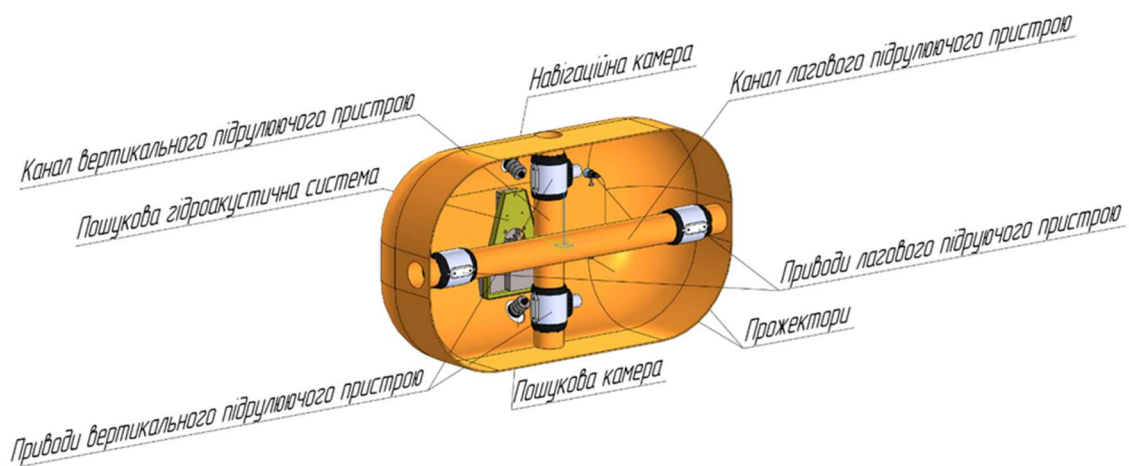


Рисунок 2.3 – Носове відділення (вигляд з середини)

2.2.1.2 Центральне відділення складається з (див. рис. 2.2):

- базового блоку;
- додаткового блоку (може бути декілька).

Центральне відділення призначене для розміщення енергоконтейнерів системи електроживлення апарату.

2.2.1.3 Кормове відділення призначене для розміщення (див. рис. 2.4):

- маршових рушіїв (4 шт.);

- кормового лагового підрулюючого пристрою;
- кормового вертикального підрулюючого пристрою;
- системи кріплення кабель-буксиру;
- кормової навігаційної камери та іншого обладнання.

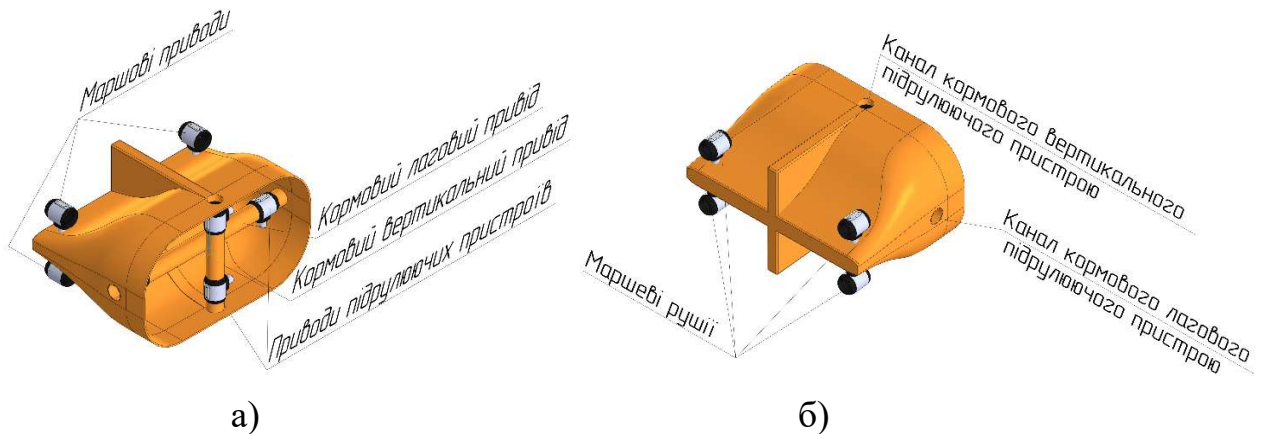


Рисунок 2.4 – Кормове відділення

а) вигляд з переду

б) вигляд з корми

2.2.2 Опис конструкції кабель-буксиру

Призначений для двонаправленої передачі на радіобуй телеметричної інформації та напруги живлення для радіочастотних пристроїв, в тому числі й супутникової системи зв'язку.

Fathom Tether — це високоякісний трос, розроблений спеціально для ROV та інших підводних застосувань. Він нейтрально плавучий, має міцність на розрив 300-350 фунтів і вбудований водоблокуючим волокном для ущільнення будь-яких витоків. Завдяки діаметрам 4 мм і 7,6 мм ці троси тонші за переважну більшість порівнянних тросиків ROV.

Конструкція кабель-буксира наведена на рис. 2.5.

Трос несе одну або чотири неекрановані кручені пари (UTP) дроту 26AWG. Ці пари пофарбовані та розташовані так само, як мережевий кабель Cat5, включаючи стійкість до перехресних перешкод. Попередньо встановлений штекер Binder 770 полегшує підключення до FXTI та Fathom

Spool . На іншому кінці встановлюється кабельний прохідник для взаємодії з BlueROV2 або будь-яким із наших водонепроникних корпусів.

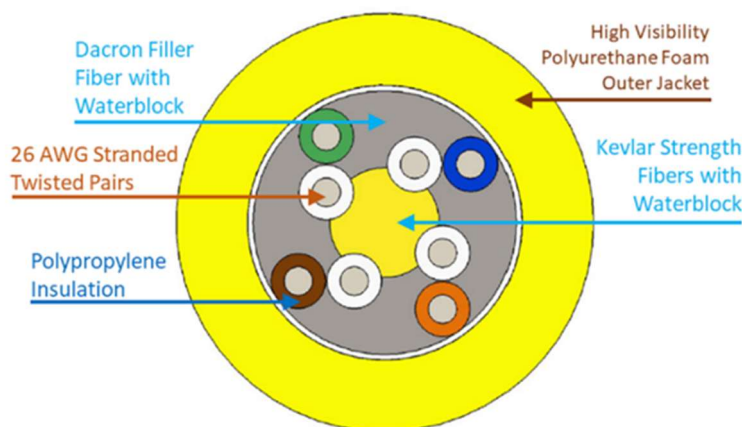


Рисунок 2.5 – Конструкція кабель-буксира CAB-NBPUF-4UTP-26AWG-R2-PUBLIC

Серцевина кабелю містить кевларові нитки для міцності та дакронові волокна для заповнення простору. Обидва волокна просочені водоблокуючою сумішшю для блокування будь-яких витоків, викликаних надрізами або розривами кабелю. Помітна жовта куртка з пінополіуретану стійка до стирання та забезпечує нейтральну плавучість.

Жорсткість кабелю розроблена так, щоб бути достатньо гнучким, щоб надати багато свободи вашому ROV, але достатньо жорстким, щоб його не було легко заплутати.

2.2.3 Опис конструкції радіобуя

Забезпечує радіочастотний зв'язок АНПА з судном носієм в стандарті WiFi та з береговими базами управління по супутниковому каналу. Структура та склад обладнання радіобуя наведено на рис. 2.6.

Апаратура радіобуя забезпечує:

- визначення координат – супутникова система GPSS;
- радіозв'язок в стандарті WiFi – канал телекерування та передачі інформації від системи телеметрії АНПА, відеокамер (АНПА та радіобуя) та ПГАС;

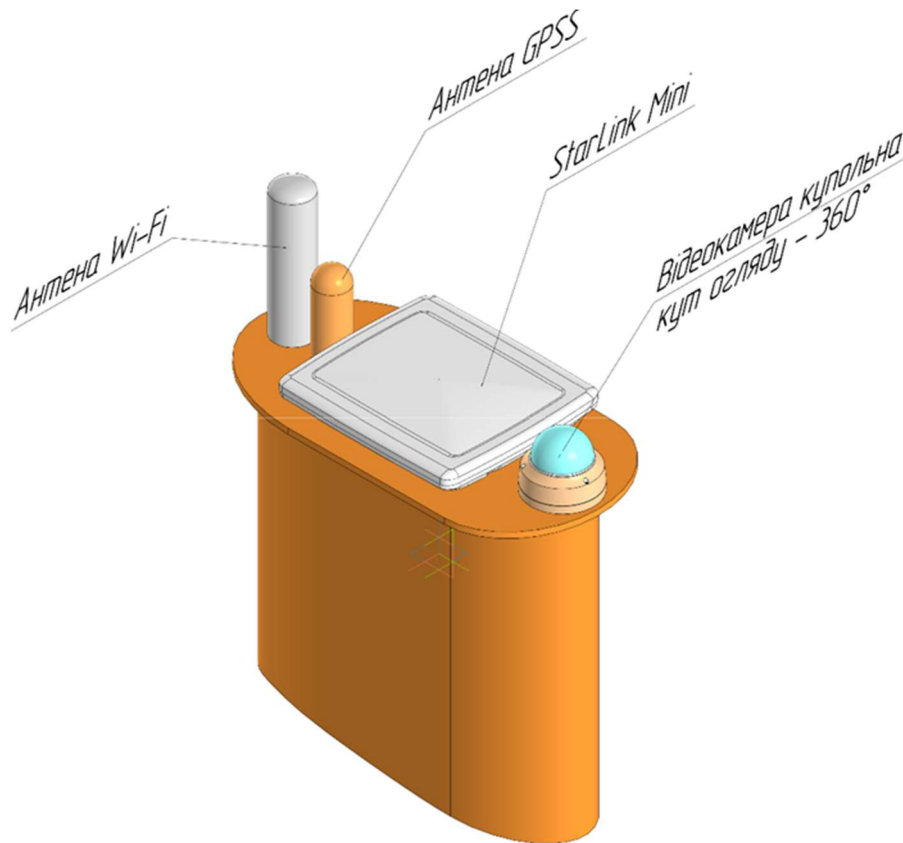


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд радіобую

- супутниковий зв'язок – стандарт Starlink (Starlink Mini);
- огляд надводної обстановки – кульова відеокамера, що забезпечує 360° огляду в горизонтальній площині.

Конструкційно, радіобуй має конфігурацію крила симетричного профілю NASA0012, розміщеного вертикально.

2.3 Опис системи автоматизованого керування

Система автоматичного керування повинна концентрувати в собі всю поточну інформацію про стан систем апарата, його географічне положення і відомості про оточуюче середовище. Дана інформація повинна оброблятися в розрахунковому модулі та формувати відповідні сигнали керування виконавчими механізмами. Тому структурна схема САК являє собою структуру системи інформаційного обміну АНПА (рис. 2.7).

2.3.1 Система автоматизованого керування (САК) складатися:

- БК – бортовий комп'ютер;
- БПІ – блок перетворення інтерфейсів;
- ПІ – перетворювач інтерфейсу USB-RS232
- РІ – розширювач інтерфейсу

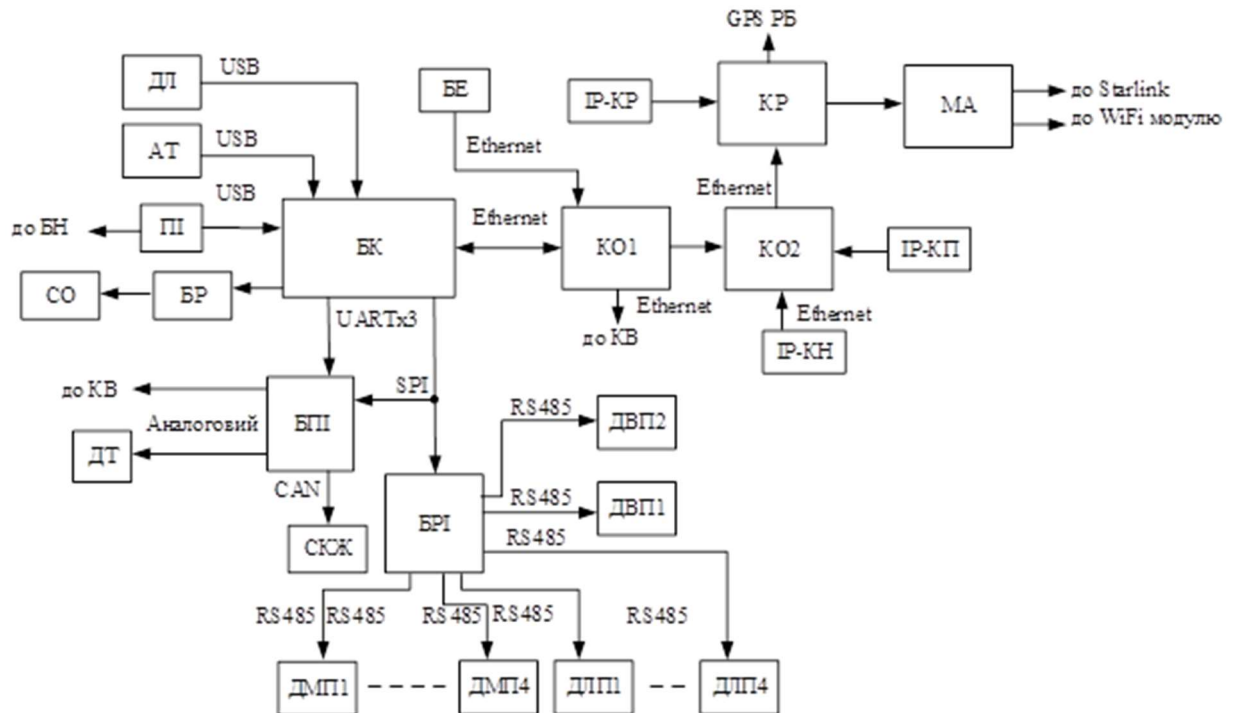


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи автоматичного керування

На схемі прийняті наступні позначення:

- АТ – альтиметр;
- БЕ – багатопроточний ехолот;
- БН – блок навігації;
- БР – блок реле;
- БРІ – блок розширення інтерфейсів;
- ДЛ – доплеровий лаг;
- ДВП 1-2 – драйвер вертикального приводу
- ДМП 1-4 – драйвер маршового приводу, де 1-4 номер приводу;
- ДЛП 1-4 – драйвер лагового приводу, де 1-4 номер приводу;
- ДТ – датчик тиску;

- IP-КН – навігаційна IP-камера;
- IP-КП – пошукова IP-камера;
- IP-КР – IP-камера радіобуя;
- КО1,2 – бортовий Ethernet комутатор;
- КР – Ethernet комутатор радіобуя;
- МА – маршрутизатор;
- СО – система освітлення;
- СКЖ – система керування живленням.

2.3.2 Основні характеристики САК

Режими керування	автоматизований / ручний
Керування начіпним обладнанням	Ручне
Напруга джерела живлення	24 В
Протокол керування	MAVLink V2
Зворотній зв'язок	положення; параметри батареї; поточний стан начіпного обладнання;
Інтерфейси зв'язку з корисним вантажем	Ethernet, RS485 (шт 3)

2.4 Опис системи навігації

2.4.1 Основні задачі системи навігації

Процес визначення підводного положення має одну ключову відмінність від надводної навігації: GNSS або супутникова навігація не працює під водою, тому АНПА потребує альтернативних джерел навігації. Інструменти та методи, які використовуються для підводної (і надводної) навігації, досить різноманітні, а їхня складність і вартість варіюються залежно від того,

наскільки потрібна точність. Визначення координат в підводному положенні називається автономним розрахунком, також при наявному радіобуї є можливість використання системи USBL.

Автономна – розрахунок проходить під час відсутності сигналу GNSS. Залежно від виконуваних автономних операцій буде потрібний інший набір датчиків і різні рівні точності.

В даний час використовуються два класи навігаційних систем. Перший базується на вимірюваннях за допомогою акустичних хвиль (альтиметр, доплеровий лаг, багатопроменевий ехолот), а другий – на ідеї інерційних датчиків таких як акселерометри, гіроскопи.

На відмінно від GNSS, який має абсолютну похибку вимірювання (не змінюється в часі), альтернативні джерела навігації мають інтегральну похибку (збільшується на протязі всього часу) вимірювання географічних координат. Це обумовлено тим, що доплеровий лаг вимірює швидкість руху, а відстань розраховується математичним апаратом шляхом інтегрування вимірної швидкості, а акселерометр може вимірювати прискорення, що вимагає подвійного інтегрування для визначення пройденого шляху.

Система USBL містить передавач, встановлений на АНПА, і приймальний модуль, розташований на поверхні (радіобуй). Дана система приймає сигнал від GPS на стороні приймального модулю, а також визначає відносне положення до АНПА тим самим визначаючи його географічне положення без накопичення помилки.

2.4.2 Структурна схема системи навігації

В навігаційній системі ССІ навігаційні дані збираються та оброблюються в бортовому комп'ютері. Система інформаційного обміну системи навігації має топологію типу зірка (рис. 2.8) де центральним органом є саме блок керування що складається безпосередньо з бортового комп'ютера та пристроїв перетворення інтерфейсів для узгодження комунікаційних параметрів.

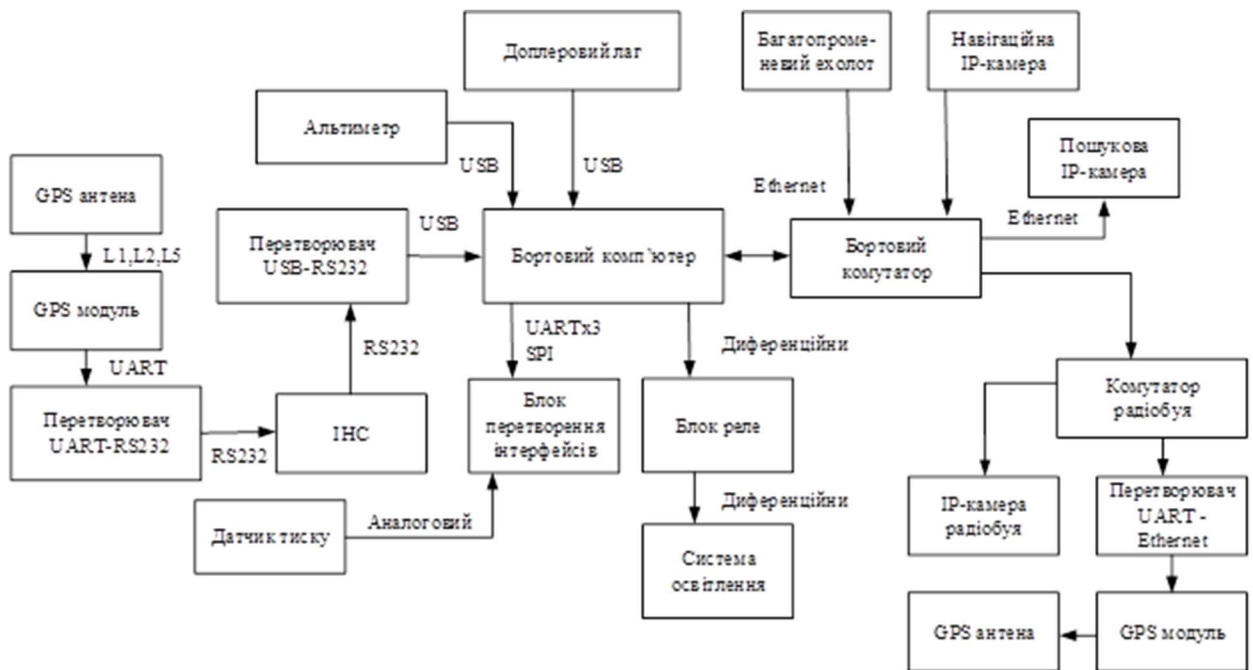


Рисунок 2.8 – Структурна схема системи навігації

2.4.3 Склад системи навігації:

а) Бортовий модуль

- Інерційна навігаційна система (Ellipse-E)
- Датки курсу
- Датчик тиску
- ПГАС (Багатопроміньовий ехолот Sonar 3D-15)
- Доплерівський лаг
- Альтиметр
- Пошукова відеокамера (IP- камера)
- Система USBL (MicronNav USBL) – Визначення точних координат апарату в підводному положення

б) Радіобуй

- Система GPSS
- Навігаційна відеокамера (IP- камера)
- Система супутникового зв'язку (Starlink)

2.4.4 Основні характеристики системи навігації:

Система позиціонування	GPS/ Інерційна
Підтримка GPS (базовий)	GPS L1/L2/L5, GLONASS L1/L2, Galileo E1/E5a/E5b, QZSS L1/L2/L5,
Точність визначення кутового положення апарата:	
– курс	0,2 °
– крен та диферент	0,1 °
Точність визначення глибини:	
– датчик тиску	± 250 мм
– альтиметр	3 мм на відстані до 17 метрів 9 мм на відстані до 50 метрів
Точність позиціонування:	
– при підтримці GPS	0,01 м
– при втраті сигналу GPS на 10 с	0,1 м
Точність визначення по системі USBL	±0,2м
Точність визначення швидкості:	
– DVL standart, %	1,01
– DVL Performance, %	0,1
– ІНС, м/с	0,1-0,5
Дальність виявлення об'єктів, мак., м	15
Кут огляду багатопроменевого ехолоту:	
– горизонтальна площа, град	90
– вертикальна площа, град	40
ІР- камери (навігаційної та камери радіобуя):	
– кут огляду, не менше, град	81
– кут повороту, град	керований (від -160° до +160°)

2.5 Постановка задачі дослідження

Для виконання завдання, в роботі розглянуто та адаптовано існуючу модель [6] до задач розробки системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування. Враховано кількість рушіїв, їх технічні характеристики та особливості побудови систем керування приводами. Враховано, що основним керуючим органом є САК АНПА, яка формує управляючі команди для контролерів конкретних двигунів.

Одночасно з цим, АНПА оснащений великою кількістю пристроїв контролю просторового положення (ІНС, ГАС, доплерівський лаг) та параметрів руху (ІНС, доплерівський лаг), які обробляються, коригуються, за необхідності в відповідності сигналів GPSS, та узагальнюються САК.

Таким чином, основна задача, яка виконується при розробці системи автоматизованого керування просторовим рухом полягає в створенні спеціалізованого програмного модуля. Враховуючи можливості середовища Matlab та його можливість трансліювати математичні моделі в програмний код, подальший синтез системи керування приводами АНПА виконується в Matlab R2023b.

Для верифікації запропонованої моделі системи керування приводами АНПА, в роботі необхідно провести дослідження її працездатності на існуючих прототипах [45].

Дослідження запропонованої моделі системи керування приводами АНПА за технічними характеристиками комплексу АНПА-ГР.Мк1 для гуманітарного розмінування з метою підтвердження працездатності запропонованої моделі системи керування просторовим положенням та рухом АНПА.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

3.1 Опис математичної моделі руху твердого тіла

Опис математичної моделі руху твердого тіла

Математичне моделювання руху твердого тіла є важливою частиною проєктування системи керування автономного підводного апарата. Така модель дозволяє описати динаміку руху апарата в тривимірному просторі, враховуючи як поступальний, так і обертальний рух, вплив сил з боку навколишнього середовища (гідродинамічний опір, архімедова сила, тягові сили гвинтів тощо), а також інерційні характеристики самого апарата.[63]

Координатні системи:

- **Інерціальна система координат (земна):** використовується для відстеження положення апарата в просторі;
- **Пов'язана система координат (апаратна):** жорстко прив'язана до корпусу апарата.

Рівняння поступального руху:

Поступальний рух описується другим законом Ньютона:

$$\sum \vec{F} = m \times \vec{a}$$

де: $\vec{F}$ – сумарна сила,

m – маса апарата,

$\vec{a}$ – вектор прискорення центру мас.

Враховується дія:

- сили гравітації (у вертикальному напрямку);
- сили плавучості (архімедова сила);
- гідродинамічного опору;

- тягової сили гвинтів;
- додаткових збурень (течії).

Рівняння обертального руху:

$$\vec{M} = I \times \vec{\alpha}$$

де: $\vec{M}$ – сумарний момент сил,

I – тензор інерції тіла,

$\vec{\alpha}$ – вектор кутового прискорення.

Для визначення орієнтації апарата в просторі використовуються кути Ейлера або кватерніони. Зв'язок між кутовою швидкістю та зміною орієнтації:

$$\vec{\dot{\theta}} = T * \vec{\omega},$$

де $\vec{\omega}$ – кутова швидкість,

$T(\vec{\theta})$ – матриця переходу для кутів Ейлера.

Гідродинамічні сили:

Сили опору та моментів моделюються з урахуванням нелінійної залежності від швидкостей:

$$\vec{F_d} = -D * \vec{v} \quad ; \quad \vec{M_d} = -D_r * \vec{\omega}$$

де: $D; D_r$ – матриці демпфування,

$\vec{v}; \vec{\omega}$ – вектори лінійної та кутової швидкості відповідно.

Підсумкова система рівнянь:

$$M * \vec{v} + C(\vec{v}) * \vec{v} + D * \vec{v} + G = \vec{\tau}$$

де: M – матриця мас та інерції,

$C(\vec{v})$ – коріолісова матриця,

D – матриця демпфування,

G – вектор сил гравітації та плавучості,

$\vec{\tau}$ – вектор керуючих впливів (тяга).

Спрощення для 2D-моделі:

Для попередніх досліджень часто використовується двовимірна модель (рух у площині X - Y , обертання навколо осі Z), де система рівнянь зводиться до трьох основних змінних: x, y, ψ .

Застосування моделі:

- Побудова системи керування (ПІД, LQR, адаптивні методи);
- Аналіз стійкості та чутливості системи;
- Реалізація моделі у Simulink для імітації поведінки апарата.

Таким чином, математична модель руху є фундаментальною основою для синтезу системи керування автономного підводного апарата та дозволяє прогнозувати його динамічну поведінку у різних умовах експлуатації.[64]

3.2 Опис алгоритму Циглера-Нікольса

Метод Циглера-Нікольса відноситься до найбільш розповсюджених емпіричних методів налаштування ПІД-регуляторів і передбачає визначення початкових параметрів регулятора без побудови точної математичної моделі об'єкта керування. Метод ґрунтується на реакції досліджуваної системи на зовнішнє збурення та застосовується переважно для регулювання в умовах експерименту.[65]

У рамках цього досліджується метод незатухаючих коливань, який включає наступну послідовність дій:

1. Перехід у П-режим:

Відключення інтегральної ($T_i \rightarrow \infty$) і диференціальної ($T_d = 0$) складових ПІД-регулятора.

Працює тільки пропорційна частина регулятора (Р-регулювання).

2. Поступове збільшення коефіцієнта підсилення K_p :

В систему подається невелике стрибкоподібне збурення (наприклад, зміна уставки).

Значення коефіцієнта підсилювання збільшується поступово доти, доки система не починає генерувати незатухаючі гармонічні коливання на виході.

3. Фіксація критичних параметрів:

Після досягнення межі коливальної стійкості фіксується (див. рис. 3.1):

- критичний коефіцієнт підсилювання: $K_{кр}$
- період коливань: $T_{кр}$.

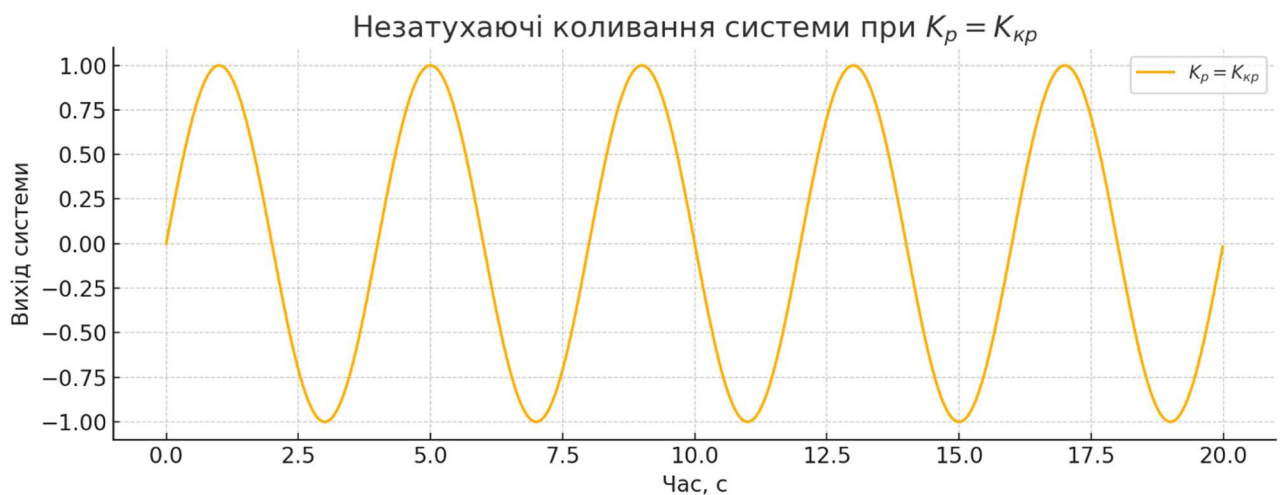


Рисунок 3.1 – Графік незатухаючих коливань системи при $K_p = K_{кр}$, який відповідає умовам методу Циглера–Нікольса: система працює на межі стійкості, реагуючи синусоподібними коливаннями постійної амплітуди.

4. Обчислення параметрів П, ПІ та ПІД-регуляторів:

Параметри знаходять згідно класичної рекомендації Циглера–Нікольса, викладеної у табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Параметри коефіцієнтів для регуляторів за класичними рекомендаціями Циглера–Нікольса

Тип регулятора	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 * K_{кр}$		4
PI	$0.45 * K_{кр}$	$T_{кр}/1.2$	
PID	$0.6 * K_{кр}$	$0.5 * T_{кр}$	$0.125 * T_{кр}$

Таким чином, співвідношення алгоритму Циглера–Нікольса також дозволяє швидко одержати придатні для подальшої оптимізації системи керування автономного підводного апарата початкові налаштування регулятора в умовах складного водного середовища.

3.3 Опис модернізації класичного ПІД регулятора

Класичний ПІД-регулятор широко застосовується у системах автоматичного керування завдяки своїй простоті, універсальності та здатності забезпечувати прийнятну якість керування для широкого класу об'єктів[66]. Однак в умовах реального середовища, особливо у випадку роботи автономного підводного апарата (АПА), класичний регулятор часто потребує вдосконалення для підвищення точності, стійкості та адаптивності.

Розглянемо ключові напрямки модернізації ПІД-регулятора, які дозволяють адаптувати його до складних умов експлуатації:

а) Антиінтегральне насичення (Anti-windup)

Проблема: При тривалому перебуванні виконавчого органу в режимі насичення інтегральна складова продовжує накопичувати помилку, що призводить до перерегулювання після виходу із насичення.

Рішення – уведення механізму обмеження інтегруючого впливу:

- блокується накопичення інтегральної помилки, якщо вихід ПІД-регулятора насичений;
- додатково використовується зворотний зв'язок для скидання інтегратора.

б) Фільтрація диференціальної складової

Проблема: Диференціальна складова чутлива до шуму, що може призвести до нестабільності або паразитних коливань.

Рішення:

- Використання фільтра нижніх частот (зазвичай першого порядку) для приглушення високочастотного шуму;

в) Адаптивний ПІД-регулятор

Ідея: Автоматична зміна параметрів ПІД-регулятора в залежності від:

- зміни динаміки об'єкта (температури, навантаження тощо),
- режиму роботи (пуск, стабілізація, аварійне гальмування тощо).

Методи реалізації:

- оновлення коефіцієнтів на основі онлайн-ідентифікації моделі об'єкта;
- застосування логіки нечітких множин або нейронних мереж.

г) Нечіткий ПІД-регулятор (Fuzzy PID) (див. рис. 3.2)

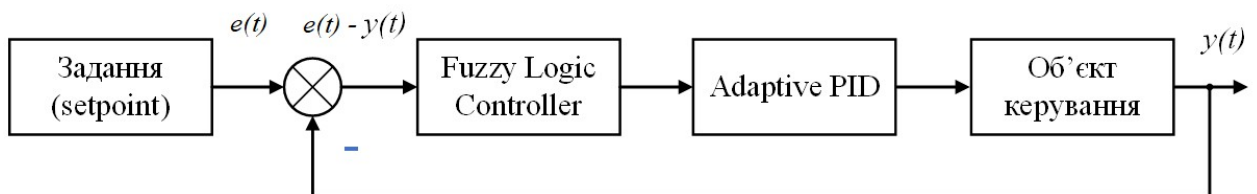


Рисунок 3.2 – Блок-схема нечіткого адаптивного ПІД-регулятора

Сутність: Комбінування класичного ПІД-регулювання з системами нечіткої логіки:

Переваги:

Вища стійкість до невизначеностей і нелінійностей.

Швидке реагування на зміну умов шляхом логічної оцінки поточної помилки та її зміни.

Така схема демонструє структуру, де вихідна помилка $e(t)$ обробляється нечіткою логікою, яка визначає параметри ПІД-регулятора в реальному часі, забезпечуючи адаптивність до змінних умов середовища.[67,68]

д) Модельно-орієнтований ПІД-регулятор (Model-based PID)

Ідея: Включення інформації про модель об'єкта в роботу ПІД-регулятора:

- компенсація запізнювання або інерційності;
- випереджувальне керування.

е) Цифрова реалізація з дискретизацією

Класичний ПІД-регулятор *реалізується* у цифровій формі в мікроконтролерах та ПЛК:

- використовується рекурсивна формула для зменшення обчислювальних витрат;
- обов'язково враховується період дискретизації;
- реалізуються додаткові фільтри та обмеження.

3.4 Моделювання руху АНПА в середовищі Matlab

З метою перевірки працездатності та ефективності системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм (АНПА РБ) було проведено моделювання його динаміки в середовищі MATLAB/Simulink. Моделювання дозволяє проаналізувати поведінку апарата в різних умовах, без ризику пошкодження реального обладнання.

Базовий алгоритм розробки моделі:

1. Вихідні припущення та модель

Для моделювання було використано спрощену математичну модель поступального руху АНПА в горизонтальній площині (ось X) з урахуванням таких чинників:

- маса апарата: m ;

- сила тяги: $F_{\text{дв}}$;
- сила опору води (лінійне гасіння): $F_{\text{оп}} = -k * v$;
- рівняння руху

Система керування реалізується у вигляді ПД-регулятора, який формує керуючий вплив $u(t)$ на виконавчий пристрій (двигун), виходячи з помилки між бажаною і фактичною швидкістю.

2. Структура моделі в Simulink

Модель в середовищі Simulink має таку структуру:

- генератор завдання (референс-швидкість);
- блок обчислення помилки;
- ПД-регулятор (з адаптивними коефіцієнтами або фіксованими);
- модель об'єкта: інтегруюче рівняння з опором;
- візуалізація результатів (Scope, XY Graph тощо).

3. Результати моделювання

На основі проведеного чисельного експерименту отримано графіки зміни швидкості та положення АНПА в часі при різних налаштуваннях регулятора.

Основні результати:

- система досягає стабільної швидкості за 6–8 секунд;
- коливання мінімальні завдяки наявності фільтра та обмежень;
- час перехідного процесу зменшується при адаптивному налаштуванні.

4. Формування висновків за результатами моделювання

Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтверджує працездатність і ефективність побудованої системи автоматичного керування АНПА з радіобуєм за умови, якщо:

- система забезпечує плавний та стабільний розгін;
- ПД-регулятор дозволяє точно слідкувати за бажаною швидкістю;

– модель легко масштабувати для додаткових координат (керування за курсом, зануренням тощо).

Результати цього етапу слугують базою для подальшого синтезу регуляторів прямолінійного руху та утримання курсу.

3.5 Синтез регуляторів прямолінійного руху

Синтез регуляторів прямолінійного руху – це процес проектування систем керування, які забезпечують стабільне та точне переміщення об'єкта (наприклад, автономного підводного апарата) по прямій траєкторії. Зазвичай синтез передбачає побудову математичної моделі руху, вибір методу керування та налаштування параметрів регулятора з урахуванням динаміки об'єкта та зовнішніх збурень.

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 спрощена структура рушійно-кермового комплексу АНПА–РБ не передбачає використання рушіїв, які б забезпечували його лаговий рух, керування рухом апарата доцільно розглядати не в прямокутній системі координат, а в циліндричній [41]. 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 чотири маршових рушії та два 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. 3.3, а саме – розподілити стабілізацію вертикальної та горизонтальної складових [42].

Стабілізація глибини виконується керуванням швидкістю занурення АНПА–РБ.

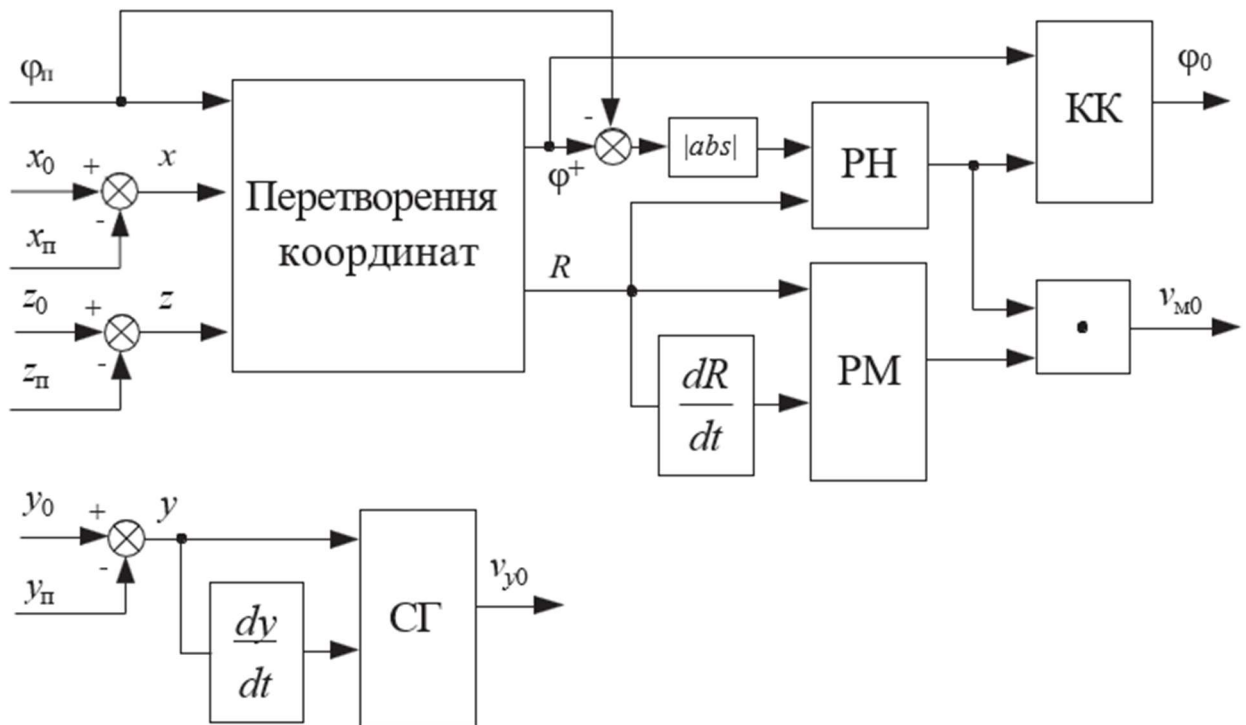


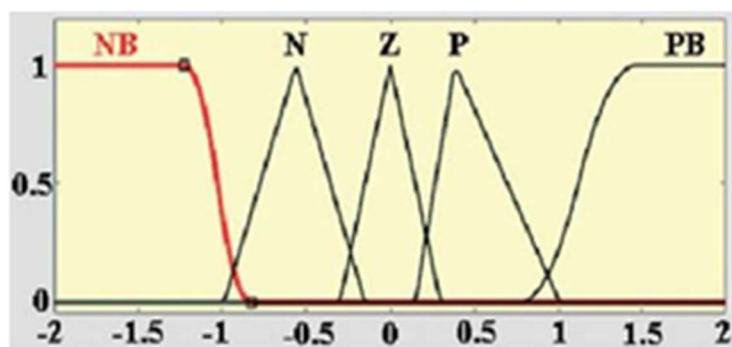
Рисунок 3.3 – Структура СПРТ

В якості стабілізатора глибини (СГ) виступає нечіткий ПД-регулятор. Його функції належності зображені на рис. 3.4.

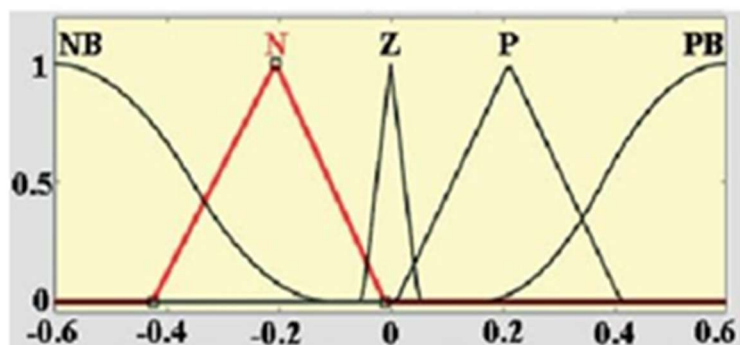
База правил СГ представлена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – База правил СГ

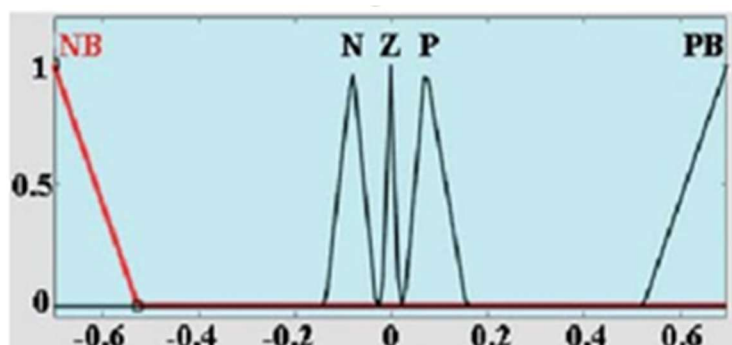
$\frac{dy}{y}$	y	NB	N	Z	P	PB
NB		PB	PB	P	P	NB
N		PB	P	P	Z	NB
Z		PB	P	Z	N	NB
P		PB	Z	N	N	NB
PB		PB	N	N	NB	NB



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 – Функції належності нечіткого стабілізатора глибини:

а) – похибка; б) – диференціал похибки; в) – вихідний сигнал

Залежність вхідних та вихідного сигналів СГ представлена нечіткою поверхнею, яку зображено на рис. 3.5.

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

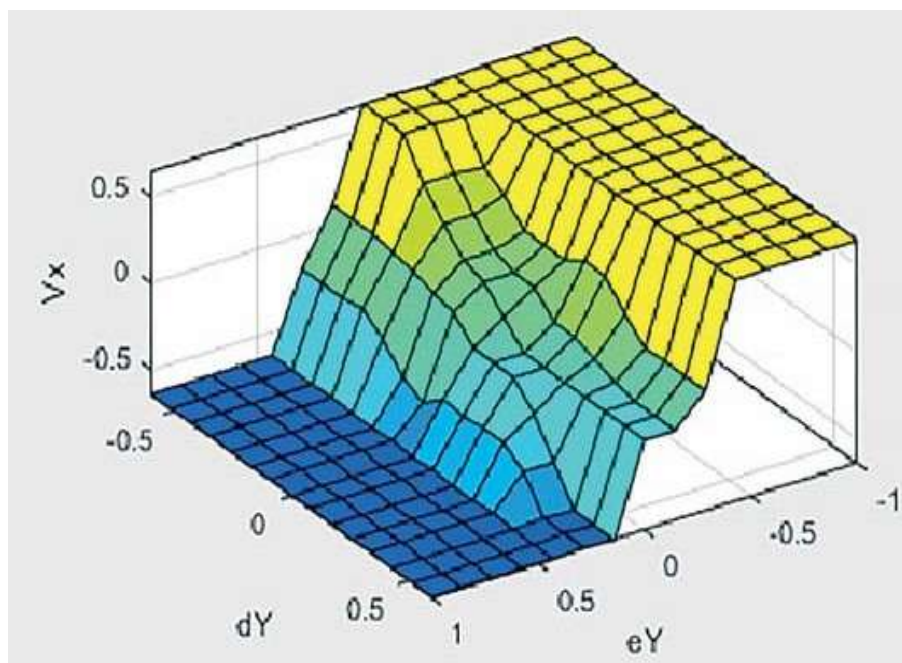


Рисунок 3.5 – Поверхня нечіткого виведення СГ

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:

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

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

де x, y, z – координати заданої точки відносно ПА в ПСК;

R – від- стань 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 не- великій 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, оскільки він може оперувати нечіткими поняттями. Функції належності нечіткого РН наведені на рис. 3.6.

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. 3.3.

Таблиця 3.3 – База правил регулятора напрямку

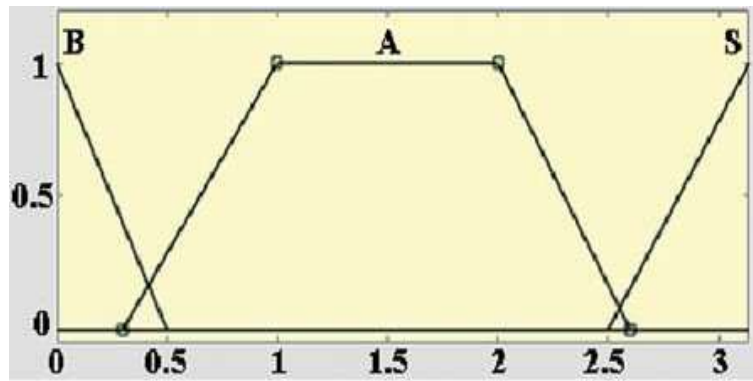
$R \backslash d\varphi $	B	A	S
M	P	Z	N
B	P	Z	Z

Поверхня нечіткого виведення для РН представлена на рис. 3.7.

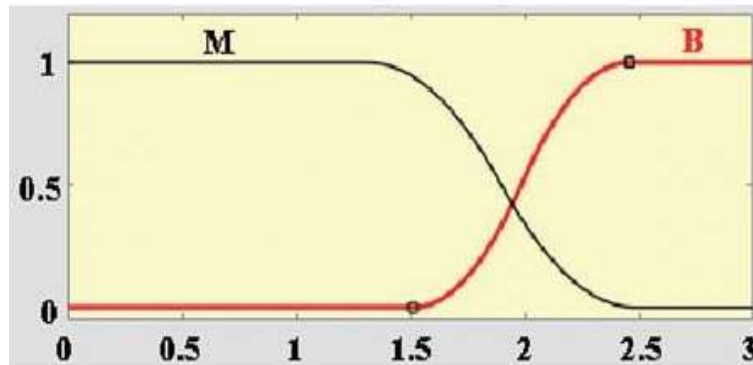
Регулятор маршового руху (РМ) керує лише швидкістю, а напрямок коригується вихідним коефіцієнтом РН. Вихідною величиною РМ є швидкість маршового руху АНПА.

Функції належності РМ приймуть вигляд (рис. 3.8).

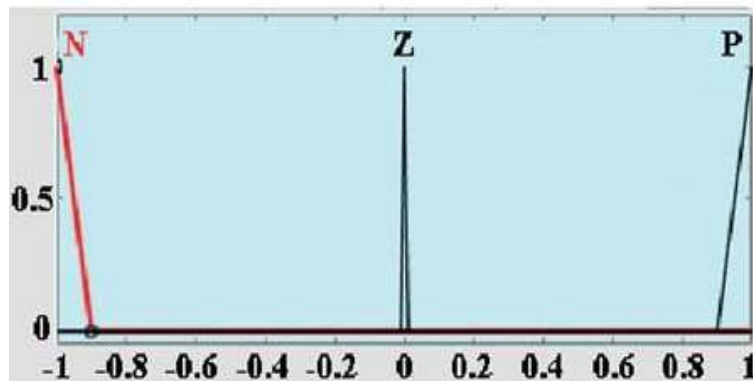
Базу правил для регулятора маршового руху зведено до табл. 3.4.



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Функції належності нечіткого регулятора напрямку:
а) – похибка курсу; б) – відстань до цілі; в) – вихідний сигнал

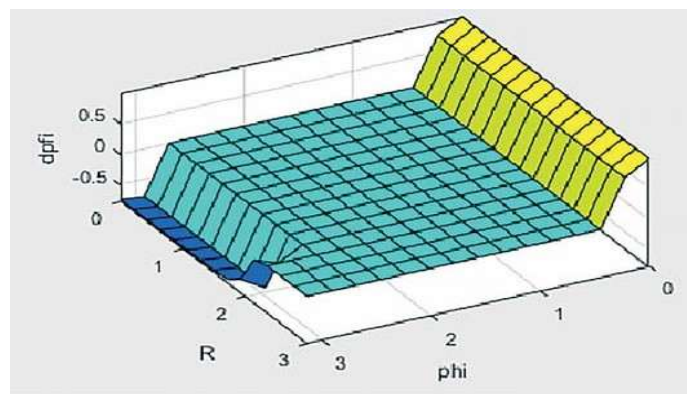
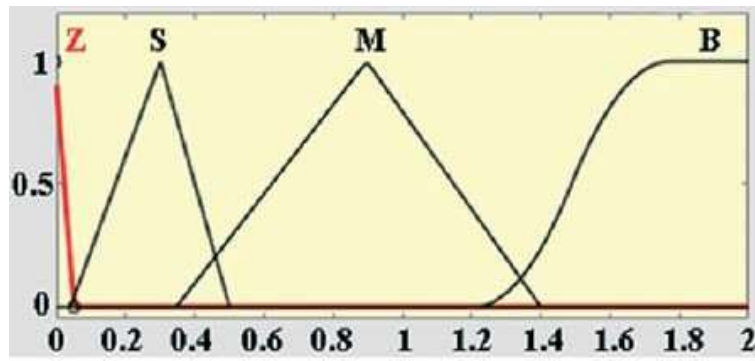
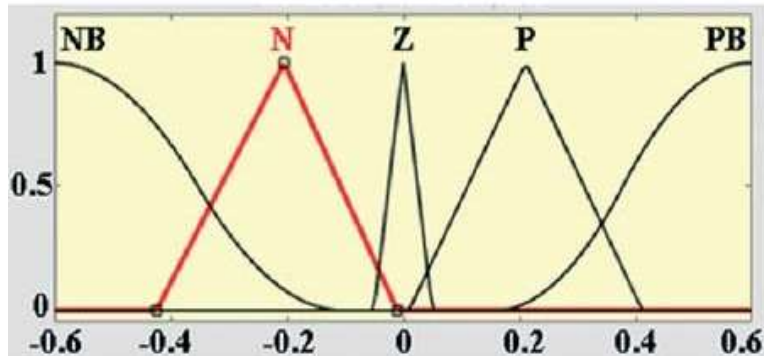


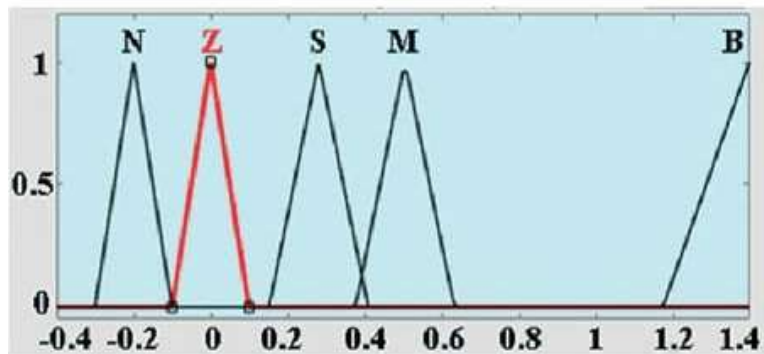
Рисунок 3.7 – Поверхня нечіткого виведення РН



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Функції належності нечіткого регулятора маршового руху:
а – відстань до цілі; б – швидкість наближення до цілі; в – вихідний сигнал

Таблиця 3.4 – База правил регулятора маршового руху

$\begin{matrix} R \\ dR \end{matrix}$	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. 3.9.

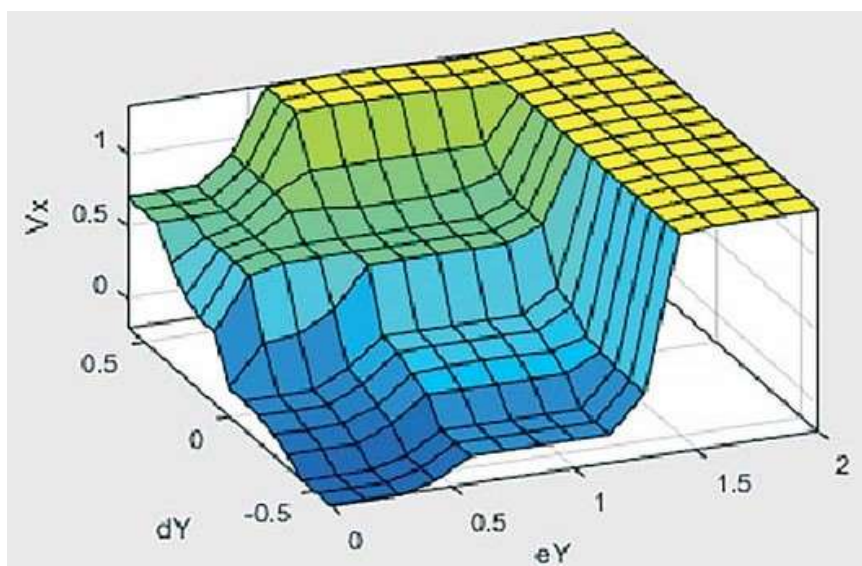


Рисунок 3.9 – Поверхня нечіткого виведення РМ

Корекція курсу після визначення напрямку руху відбувається за наступною формулою.

Реалізація системи позиціонування АНПА–РБ у робочій точці в програмному середовищі *MatLab Simulink* представлена на рис. 3.10.

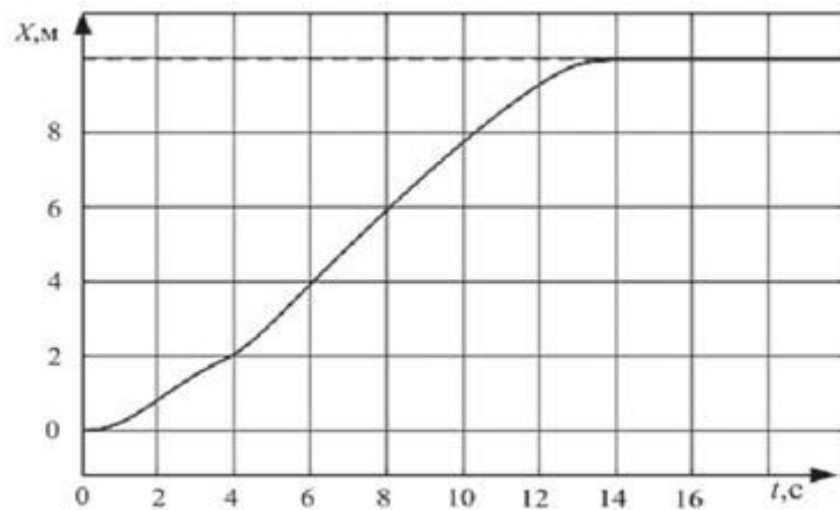
Вхідними даними для роботи системи є:

- 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.

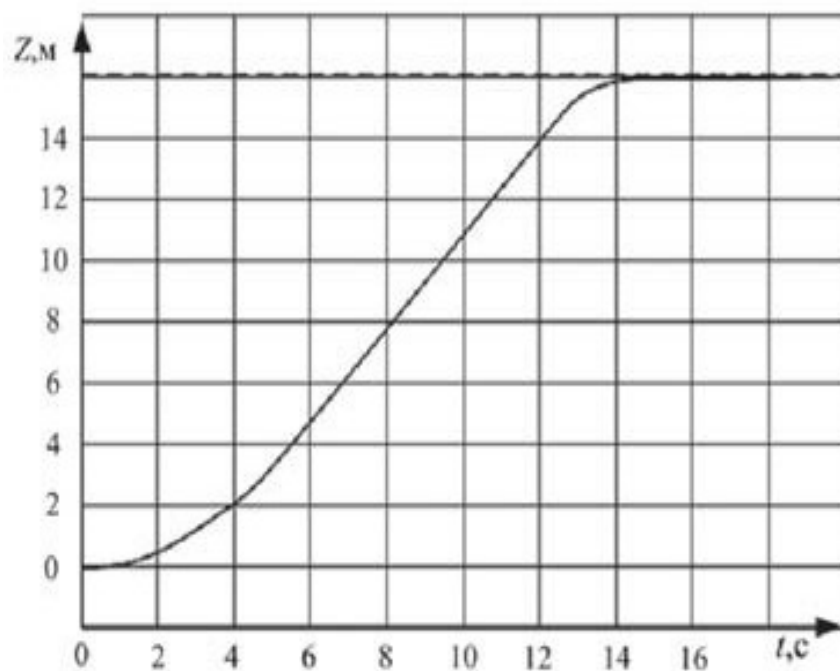
Результат порівняння поточного курсу та курсу, на виході блоку *DecToPolar* може виходити за рамки діапазону $[-\pi; \pi]$. Дану особливість враховано блоком корекції *Cor*, який реалізує вираз:

Процес стабілізації АНПА–РБ на площині представлено на рис. 3.11.





а)



б)

Рисунок 3.11 – 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. 3.4.

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.

Таблиця 3.4 – 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

3.6 Синтез регуляторів утримання курсу

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. 3.12.

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 .

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

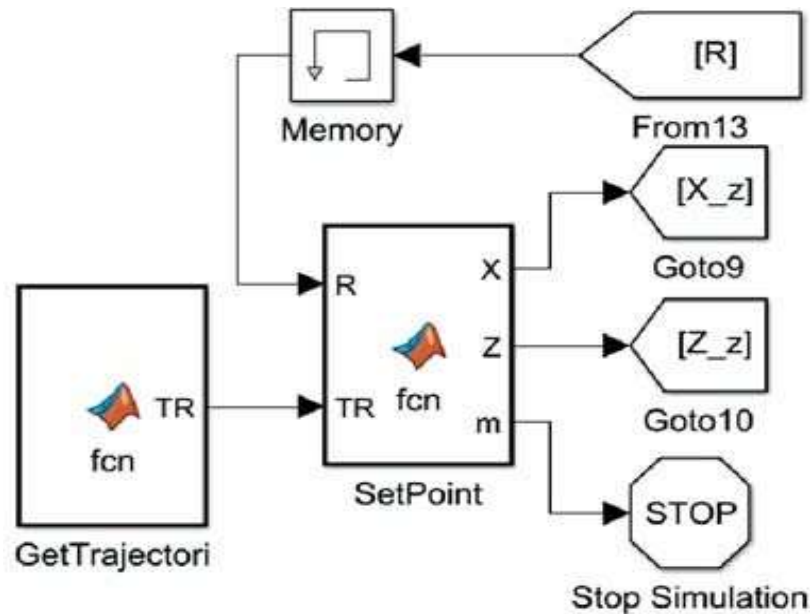


Рисунок 3.12 – Реалізація модуля CCM

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 CCM будуть отримані раніше за матрицю R .

Проходження підводного апарата при його русі по заданій траєкторії зображено на рис. 3.13.

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. 3.5.

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.

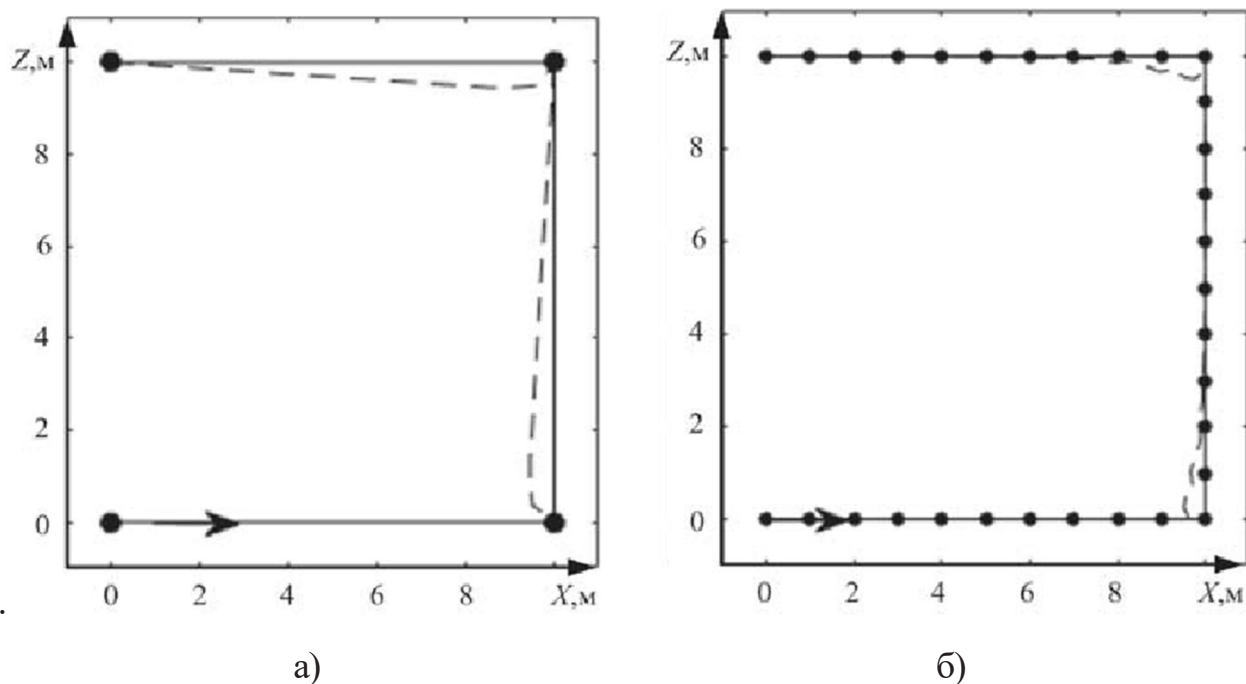


Рисунок 3.13 – Проходження по траєкторії АНПА–РБ:

— — — — — діюче значення; ————— задане значення;

а – траєкторія руху задана контрольними точками;

б – траєкторія руху задана точками з кроком 1 м

Таблиця 3.5 – 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. 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 .

В якості сигналу керування, зважаючи на досвід минулих досліджень, 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 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 [43]. 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 [44]. 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. 3.14).

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*).

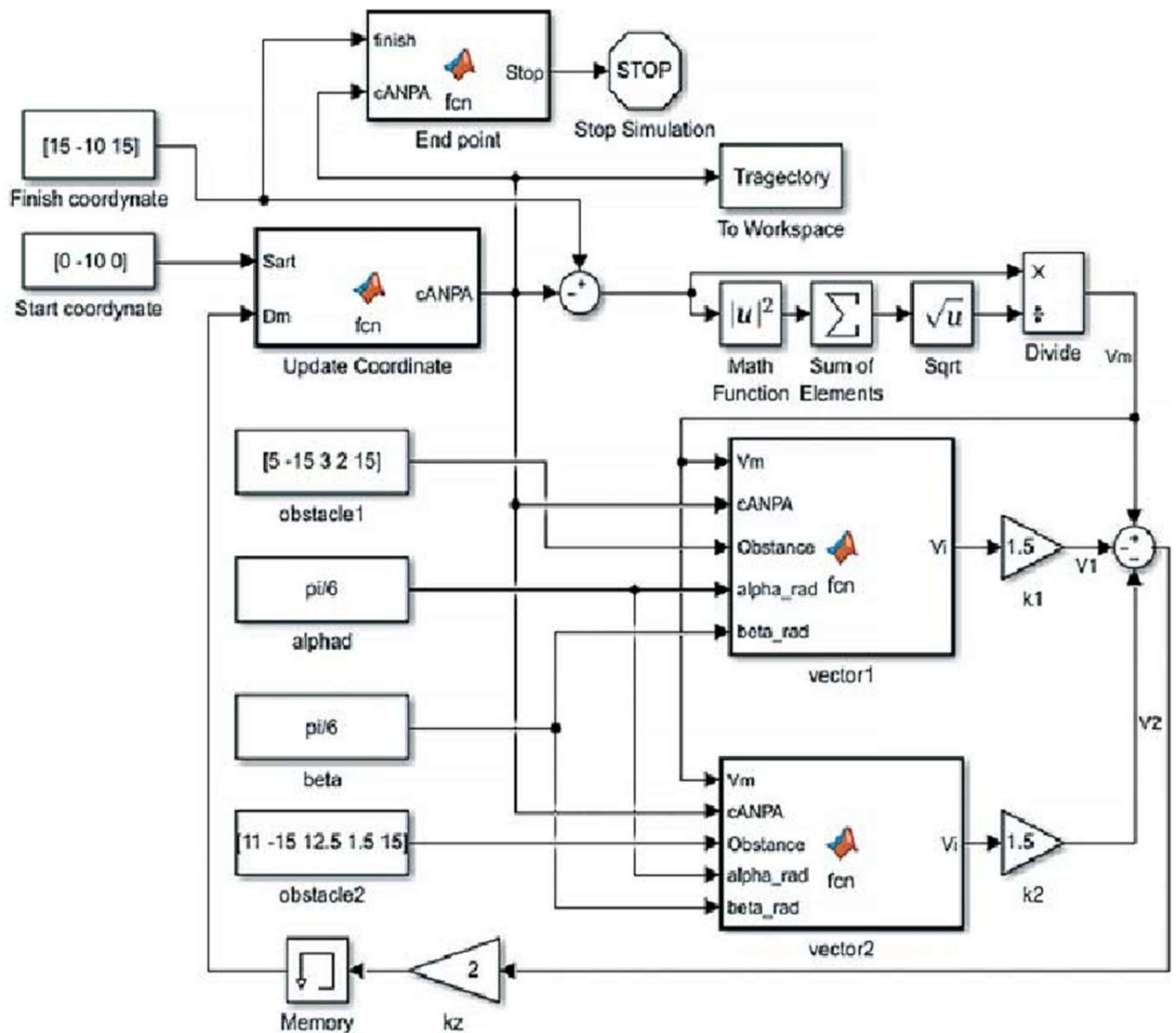


Рисунок 3.14 – Структура реалізації модуля формування траєкторії руху АНПА–РБ в акваторії з перешкодами в MatLab Simulink

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.

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

Моделювання руху АНПА (рис. 3.15) показує, що з допустимим відхиленням від контрольної точки в 0,2 м, максимальне відхилення від заданої траєкторії не перевищує 30 см.

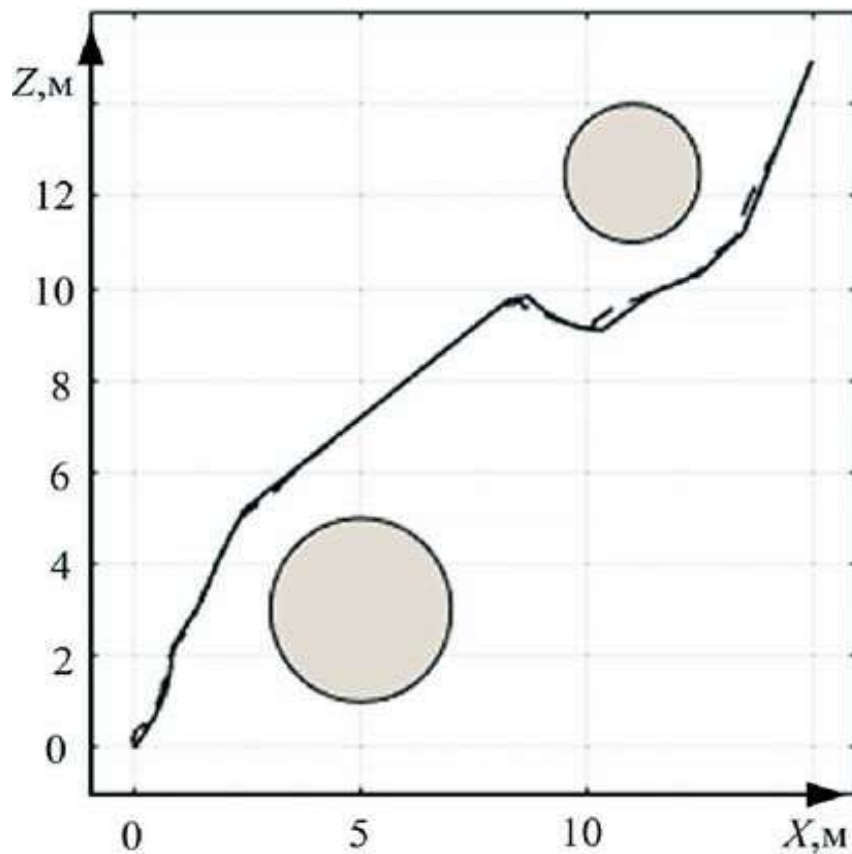


Рисунок 3.15 – Проходження АНПА–РБ по траєкторії з огинанням перешкод:

— — — — — діюче значення; ————— задане значення;

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 траскторії.

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 реалізуючи всі синтезовані алгоритми керування.

4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

4.1 Розрахунок гідродинамічного опору системи АНПА–КБ–РБ

4.1.1 Вихідні умови

Тактико-технічні характеристики АБПА:

- габарити (В×Ш×Д):
 - а) повні, не більше, м $0,8 \times 1,41 \times 3,1$
 - б) носове відділення, не більше, м $0,8 \times 1,41 \times 0,3$
 - в) центральне відділення, не більше, м $0,8 \times 1,41 \times 2,0$
 - г) кормове відділення, не більше, м $0,8 \times 1,41 \times 0,8$
- швидкість руху АБПА
 - д) на глибині більше 10 м, не менше, вузлів 3
 - е) в приповерхневому режимі, не менше, вузлів 5
- щільність води, кг/м³ 1024
- максимальна відстань руху, не менше, милі 10

Методика розрахунку заснована на [46].

4.1.2 Відповідно до теорії гідродинамічної подібності опір поздовжнього переміщення АБПА можна виразити

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_n^2}{2} \cdot \Omega \quad (4.1)$$

де C_x – безрозмірний коефіцієнт лобового опору;

ρ_0 – щільність морської води 1025 кг/м³;

v_n – швидкість руху, м/с;

Ω – площа змоченої поверхні, м².

Орієнтовно значення C_x , для підводних човнів та апаратів, які рухаються на великій глибині, в відповідності до (див. (5.19) [47]) для «голового» корпусу, можна визначити шляхом додавання окремих його складових за формулою

$$C_x = C_v + C_A + C_{AP} + C_H + C_i \quad (4.2)$$

де C_v – коефіцієнт в'язкого опору;

C_A – коефіцієнт опору шорсткості;

C_{AP} – коефіцієнт опору виступаючих частин;

C_H – коефіцієнт опору ніш, вирізів та ін.;

C_i – коефіцієнт імпульсного опору.

Підставивши значення параметрів АНПА, визначаємо, за виразом (4.2) безрозмірний коефіцієнт лобового опору

$$C_x = 5,122 \cdot 10^{-3}$$

Площу змоченої поверхні для підводних човнів та апаратів в [47] рекомендують вираховувати через водотоннажність. Однак, так як апарат має баророзвантажений гідродинамічний обтічник, використання водотоннажності є некоректним.

Площу змоченої поверхні можна визначити шляхом додавання окремих його складових за формулою

$$\Omega = \Omega_H + \Omega_{\Pi} + \Omega_K \quad (4.3)$$

$$\text{де } \Omega_H = \pi \cdot \frac{B^2}{4} + \frac{\pi \cdot B \cdot H^2}{4 \cdot \sqrt{H^2 - B^2}} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{H^2 - B^2}}{H}\right) - \text{площа поверхні носової}$$

частини апарату, визначається як площа приплюснутого півеліпсоїду;

H та B – висота та ширина апарату, відповідно ;

$\Omega_{\Pi} = P_{\text{мш}} \cdot L_{\Pi}$ – площа поверхні центральної частини апарату;

$$\Omega_K = 2 \cdot P_{MШ} \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot P_{MШ}}{\pi}\right)^2 + L_K^2} - \text{площа поверхні кормової частини}$$

апарату;

L_C, L_K – довжини центрального та кормового відділення, відповідно;

$P_{MШ}$ – периметр гідродинамічного обтічника по мідельшпангоуту.

Площа поверхні гідродинамічного обтічника центральної частини залежить від довжини апарату.

В враховуючи погрішність формул, визначимо Ω_H, Ω_K та $P_{MШ}$ за побудовою.

Отже, за виразом (4.3) маємо $\Omega = 17,682 \text{ м}^2$.

Відповідно до (4.1) опір поздовжнього переміщення АБПА буде $R_x = 2044,6 \text{ Н}$

4.1.3 Графік залежності бурсирувального опору апарата від швидкості, для робочого діапазону швидкостей руху апарата, наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Графік залежності бурсирувального опору апарата R_x від швидкості v

4.1.4 Врахування впливу кабель-буксиру (КБ) на гідродинамічний опір підводного комплексу АНПА – КБ – РБ, визначаємо за результатами моделювання КБ як гнучкої нитки в потоці рідини.

Початкові умови:

- діаметр КБ, мм, 7,6
- робоча глибина, м 30
- орієнтовні довжини КБ, м 45; 50; 55
- діапазон швидкостей, м/с від 0 до 2,5

На рис. 4.2 та в табл. 4.1 наведені результати моделювання форми кабель-буксиру в відповідності до його довжини та швидкості потоку, що набігає.

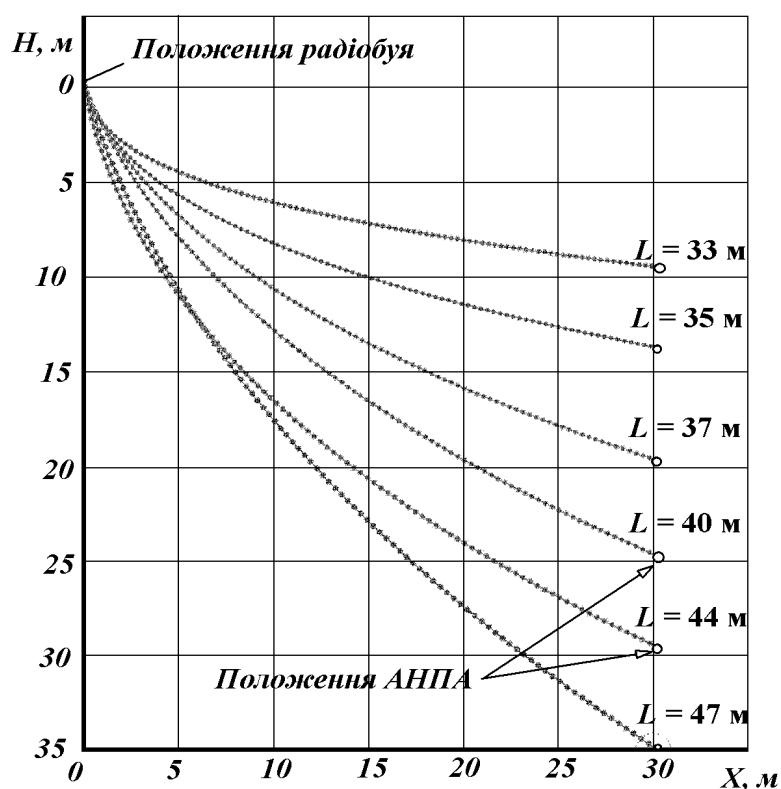


Рисунок 4.2 – Результати моделювання форми кабель-буксиру в відповідності до його довжини та швидкості потоку, що набігає, $v=1,54$ м/с

Таблиця 4.1 – Результати моделювання форми кабель-буксиру в відповідності до його довжини та швидкості потоку, що набігає

№ з/п	Швидкості потоку, що набігає, м/с	Довжина кабель-буксиру, м	Опір поздовжньому переміщенню, R_x , Н
1.	0,5	45	13
2.	1,0	45	52
3.	1,5	45	117
4.	2,0	45	208
5.	2,5	45	325
6.	0,5	50	10
7.	1,0	50	37
8.	1,5	50	83
9.	2,0	50	147
10.	2,5	50	230
11.	0,5	55	8
12.	1,0	55	32
13.	1,5	55	73
14.	2,0	55	129
15.	2,5	55	202

Як видно з рис. 4.2 та табл. 4.1 максимальне зусилля виникає при швидкості потоку, що набігає $v=2,5$ м/с при довжині кабель-буксиру 45 м та становить 325 Н.

Дослідження також показали, що зменшення довжини кабель-буксиру є не бажаним – система немає рішення, тобто апарат не зможе зануритись на потрібну глибину (до 30 м) або притопить радіо-буй.

4.1.5 Гідродинамічний опір повздовжньому переміщенню радіо-буя

Гідродинамічний опір повздовжньому переміщенню радіо-буя визначаємо по методиці, використаній в пп. 4.1.2.

Згідно з (4.1)

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho_0 \cdot v_n^2}{2} \cdot \Omega = 22 \text{ (H)},$$

де $C_x = 0,007$ (для профілю НАСА0012 [48]);

$\Omega = 0,98 \text{ м}^2$ – за побудовою.

4.1.6 Повний гідродинамічний опір повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ визначаємо з умови

$$R_x^{нов} = R_x^{АНПА} + R_x^{КТ} + R_x^{РБ} \quad (4.4)$$

де $R_x^{АНПА} = 2045 \text{ Н}$ – опір, який створює АНПА (див. пп.4.1.2);

$R_x^{КТ} = 390 \text{ Н}$ – опір, який створює КБ (див. табл. 4.1);

$R_x^{РБ} = 22 \text{ Н}$ – опір, який створює РБ (див. пп.4.1.5).

Згідно з (4.4), повний гідродинамічний опір, який створює система АНПА – КТ – РБ, при переміщенні на глибині 30 м зі швидкістю 2,5 м/с та довжиною кабель-буксира 45 м, становить $R_x^{нов} = 2457 \text{ Н}$.

Приймаємо $R_x^{нов} = 2500 \text{ Н}$.

4.1.7 Буксирувальну потужність приводів рушіїв визначаємо за формулою [46]

$$P_E = v \cdot \frac{R_x^{нов}}{Z_p \cdot \eta}, \quad (4.5)$$

де v – швидкість руху АБПА;

$Z_p=4$ – кількість гребних валів;

$\eta = 0,55$ – пропульсивний коефіцієнт.

Таким чином, потужність привода кожного з чотирьох маршових становить: $P_E = 2,8 \text{ Н}$

4.2 Розрахунок параметрів та вибір електродвигунів приводів маршових рушіїв

В відповідності до вихідних умов та результатів розрахунку гідродинамічного опору АБПА отримуємо:

– дальність руху АБПА, не менше, мілі / км	20 / 37
– швидкість руху, не менше, вузлів / м/с	5 / 2,572
– час рух, не більше, год	4
– опір води руху АБПА, не менше, Н	2400
– кількість рушіїв, шт.	4
– упор 1-го рушія, не менше, Н / кгс / lbs	600 / 61 / 135

Таким параметрам відповідає двигун POD 3.0. Його основні ТТХ наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри двигуна MODEL 2060-DD-022522 BRUSHLESS THRUSTERS

№	Параметр	Розмірність	Значення параметру
1.	Максимальна вхідна потужність	Вт	3000
2.	Номінальна напруга	В	24
3.	Вхідний струм номінальний	А	125
4.	Статичний упор рушія	кгс	24
5.	Оберти рушія	об/хв	2500

4.3 Розрахунок моделі руху системи АНПА–РБ

Дослідження запропонованого регулятора руху АНПА виконується на його математичній моделі в середовищі MatLab Simulink (див. рис. 3.14).

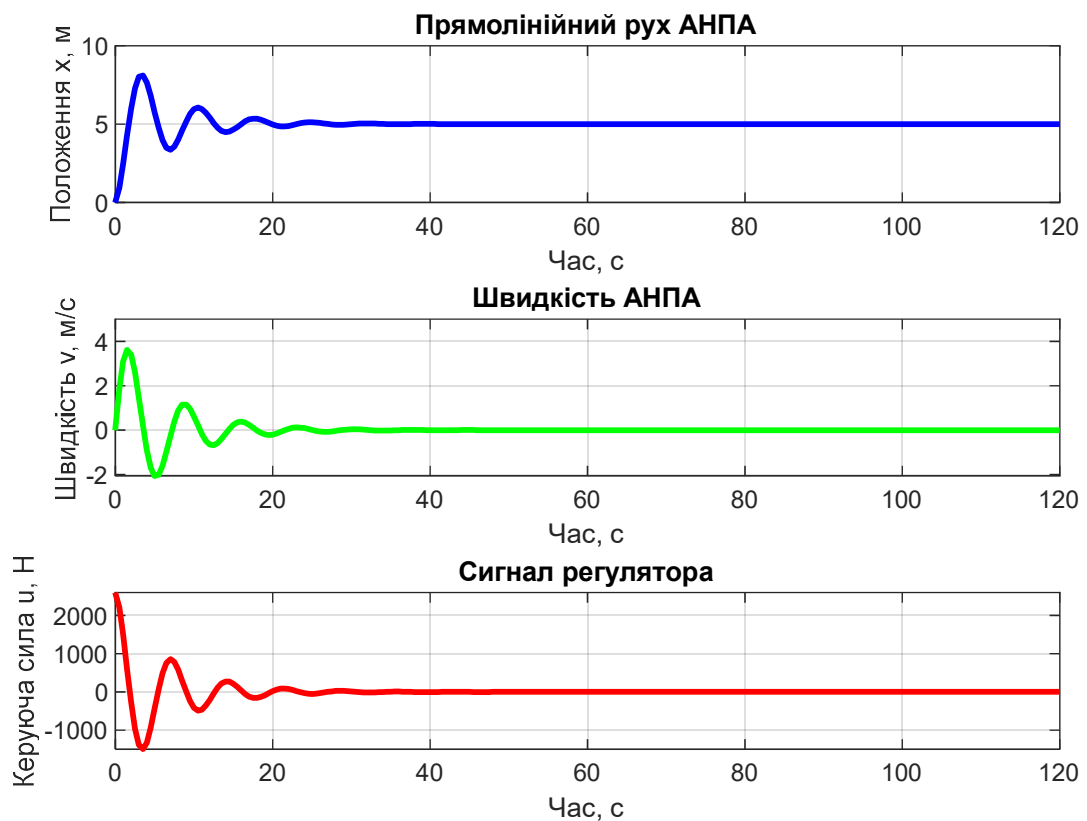
Вихідні дані, які були внесені в модель, відповідають характеристикам, зазначеним в п.2.

4.3.1 Моделювання прямолінійного руху АНПА для розімкненої системи керування

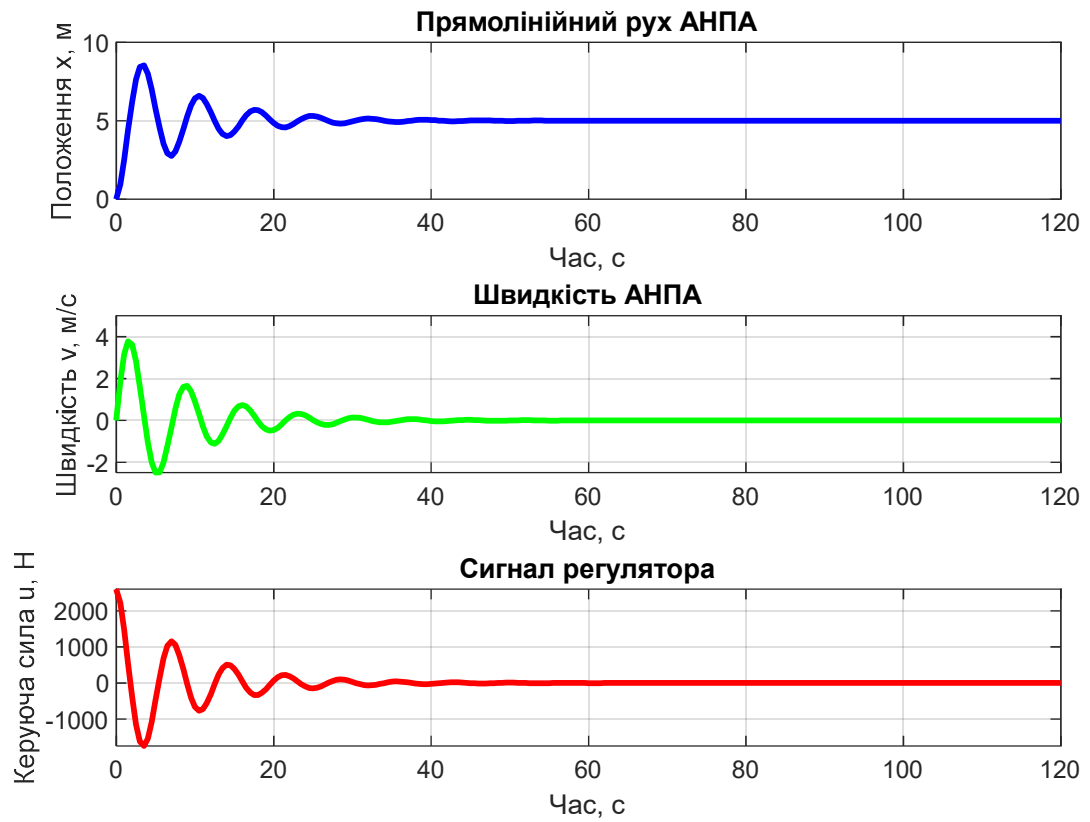
Моделювання проводиться для системи керування АНПА по осі Х з урахуванням ПІ-регулювання.

На рис. 4.3 наведені результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на фіксований крок 5 м по курсу при швидкості течії 2 вузли та зміні опір повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ (потужності маршових рушіїв).

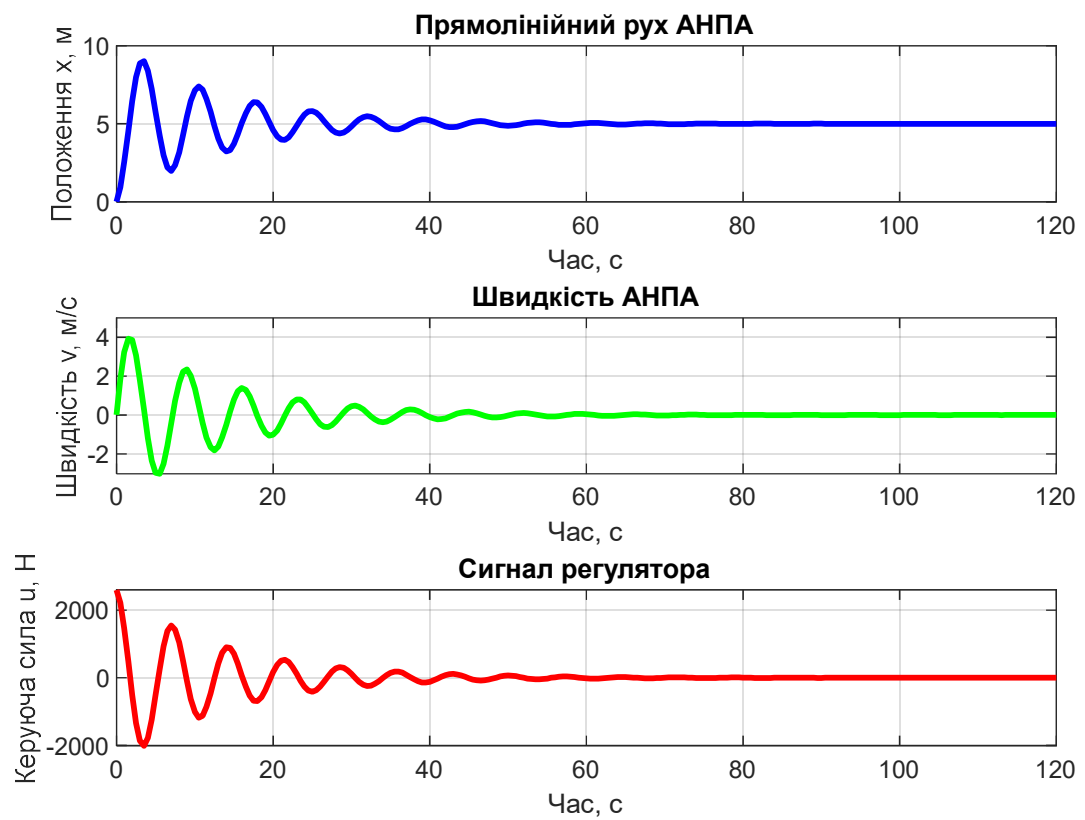
Як видно з рис. 4.3, на положення апарату впливає течія та інерційні параметри кабель-буксиру і РБ. Їх вплив проявляється як суттєва нелінійна інерційність що призводить до зміни часу стабілізації АНПА в точці з 30 с ($R_x^{нов} = 2500 \text{ Н}$) до 120 с ($R_x^{нов} = 1000 \text{ Н}$). А при $R_x^{нов} = 500 \text{ Н}$ система випадає з синхронізму і спостерігається процес розгойдування.



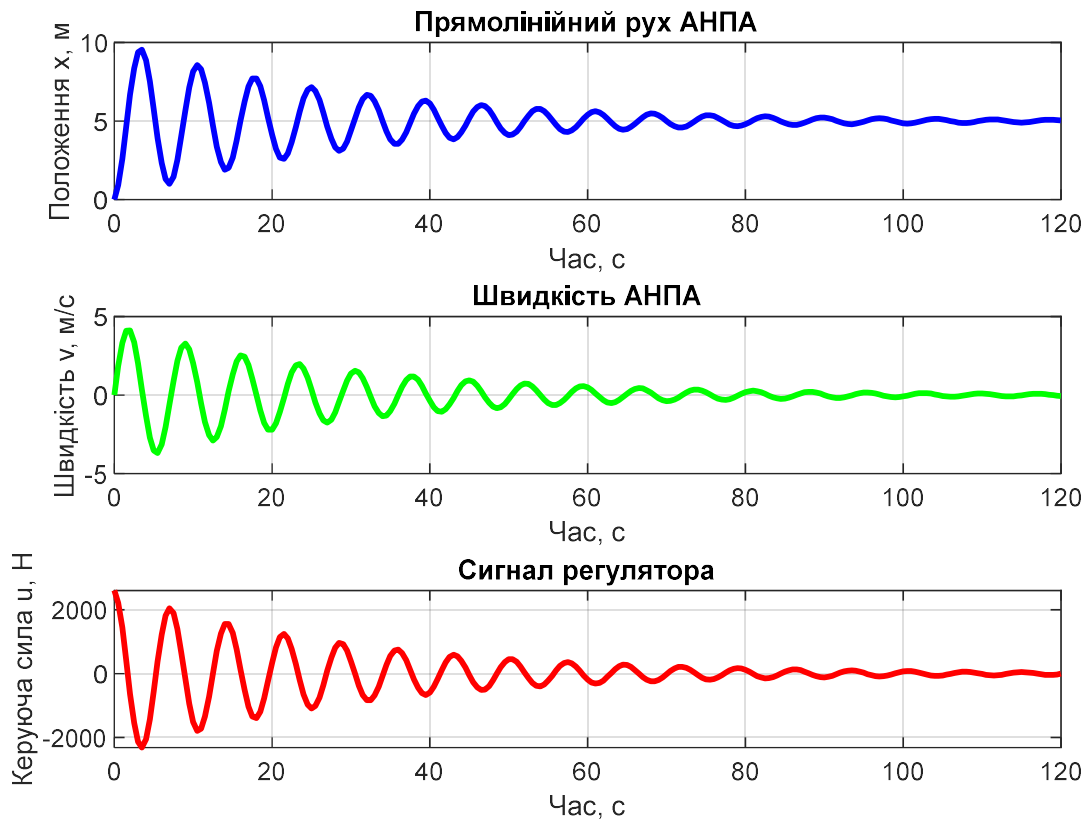
а) $R_x^{нов} = 2500 \text{ Н}$



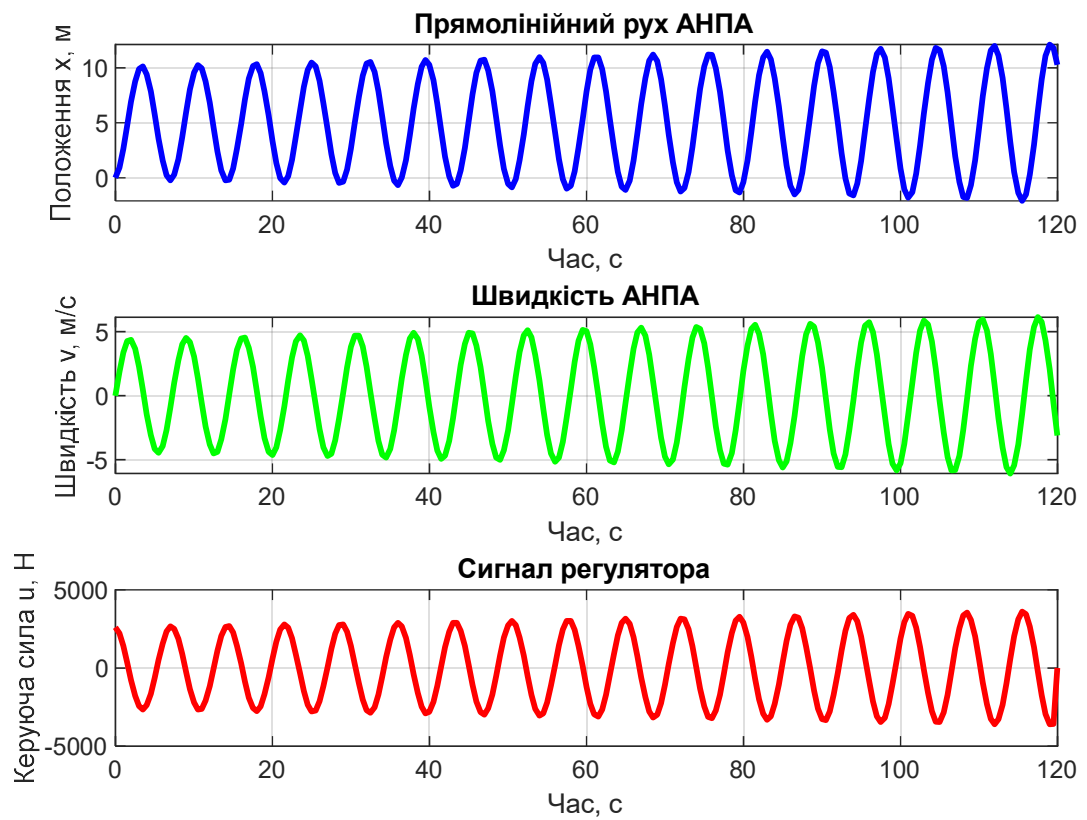
б) $R_x^{нов} = 2000 \text{ Н}$



в) $R_x^{нов} = 1500 \text{ Н}$



г) $R_x^{нов} = 1000 \text{ Н}$



д) $R_x^{нов} = 500 \text{ Н}$

Рисунок 4.3 – Результати виконання команди переміщення АНПА
(позиціонування) на 5 м по курсу

4.3.2 Моделювання прямолінійного руху АНПА для замкненої системи керування, яка стабілізує положення

Моделювання проводиться для системи керування АНПА по осі X з урахуванням ПД-регулювання за аналогічних вихідних умов до п. 4.3.1.

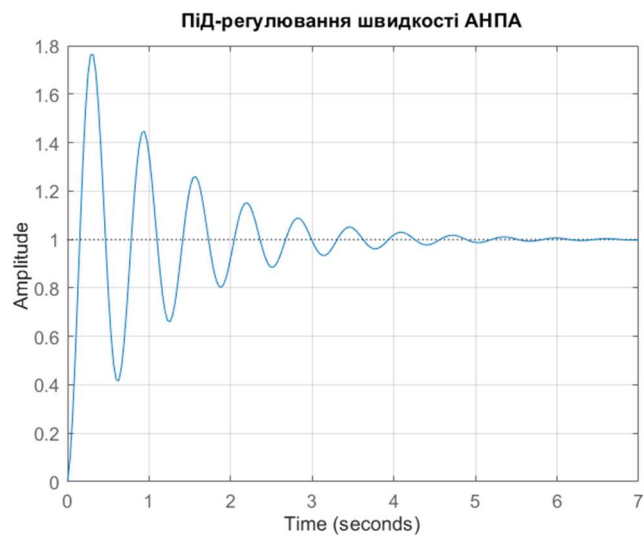
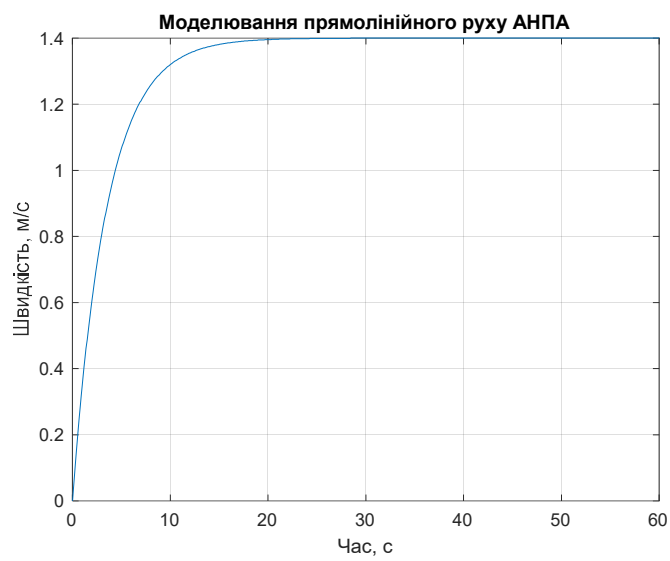
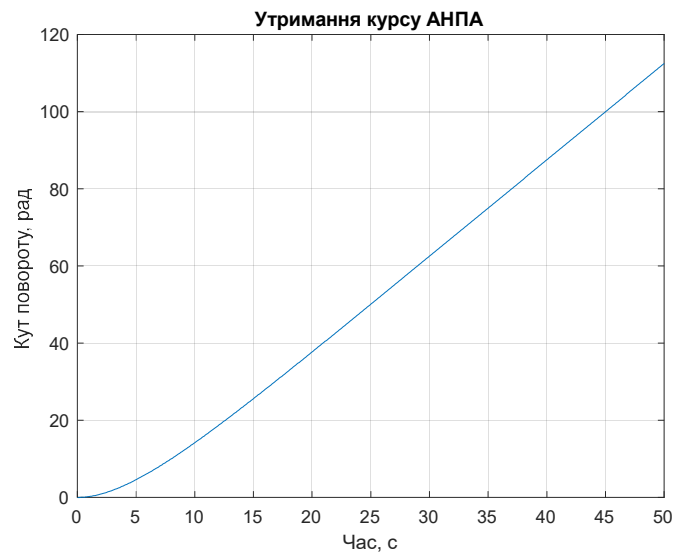
На рис. 4.4 та рис. 4.5 наведені результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на фіксований крок 5 м по курсу при швидкості течії 2 вузли та зміні опір повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ (потужності маршових рушіїв).

Як видно з отриманих результатів система згасає без значного перерегулювання завдяки налаштованим коефіцієнтам.

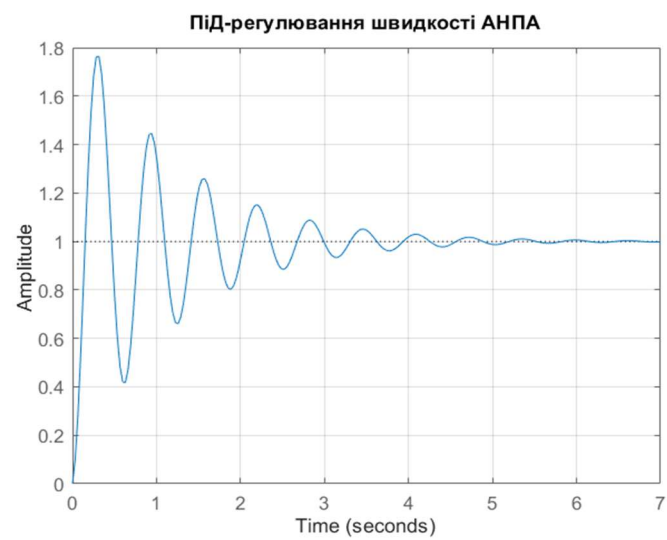
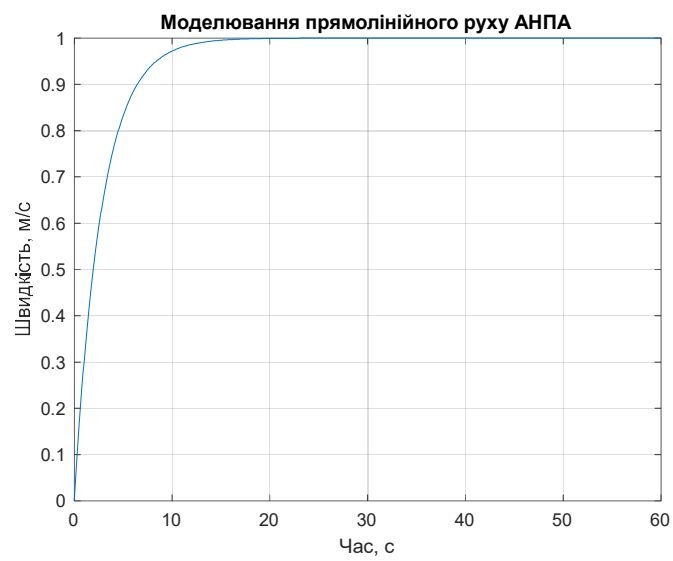
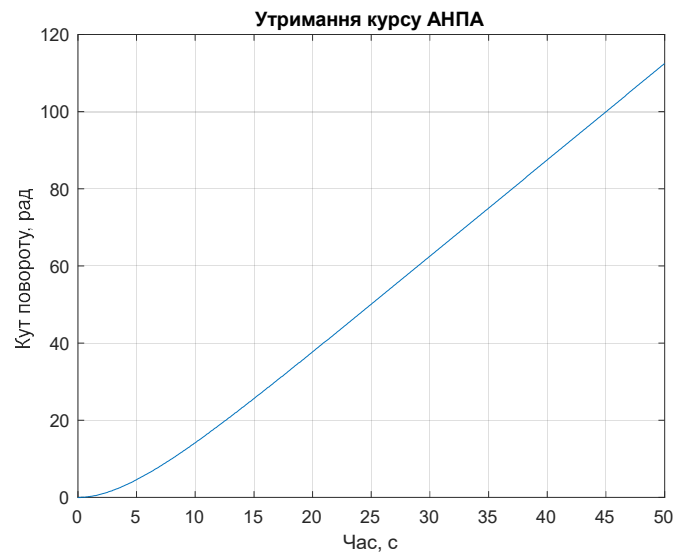
Необхідно відмітити, як видно з рис. 4.4 та 4.5, результати налаштування дозволили отримати результати які знаходяться в рамках розрахункової похибки при постійному опорі повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ та зміні тяги рушіїв ($R_x^{nog} = 2500\text{ Н} = const$ та $P_E = var$ від 2500 Н до 500 Н) та зміні опорі повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ та постійній тязі рушіїв ($R_x^{nog} = var$ від 2500 Н до 500 Н та $P_E = 2800\text{ Н} = const$).

Також, необхідно зазначити, що:

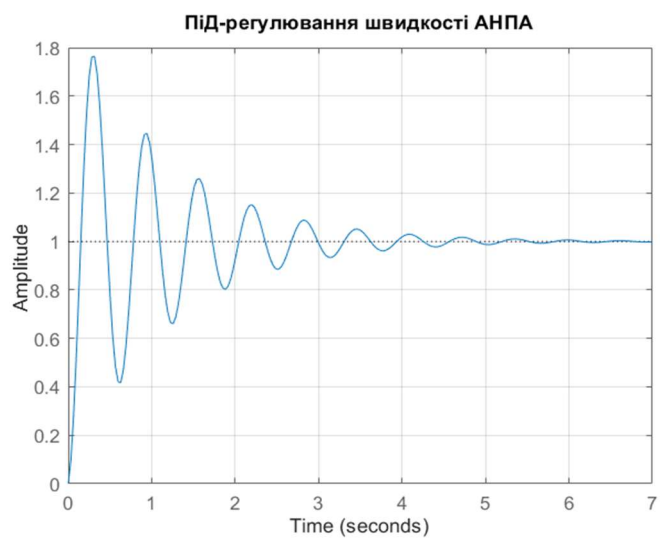
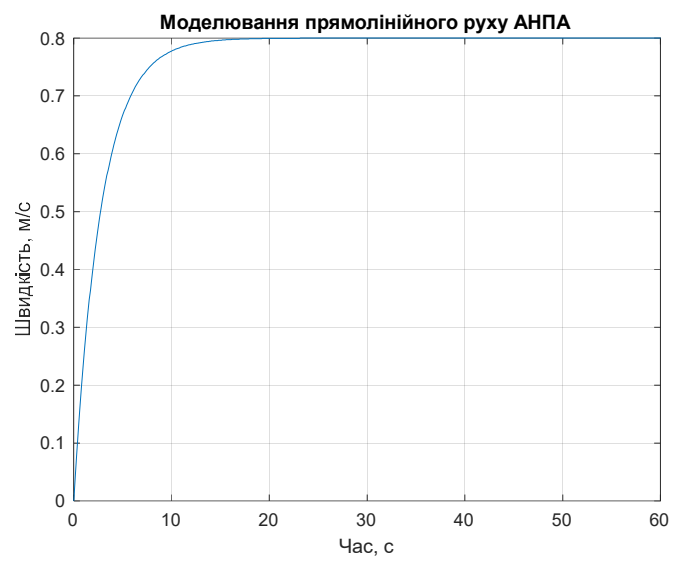
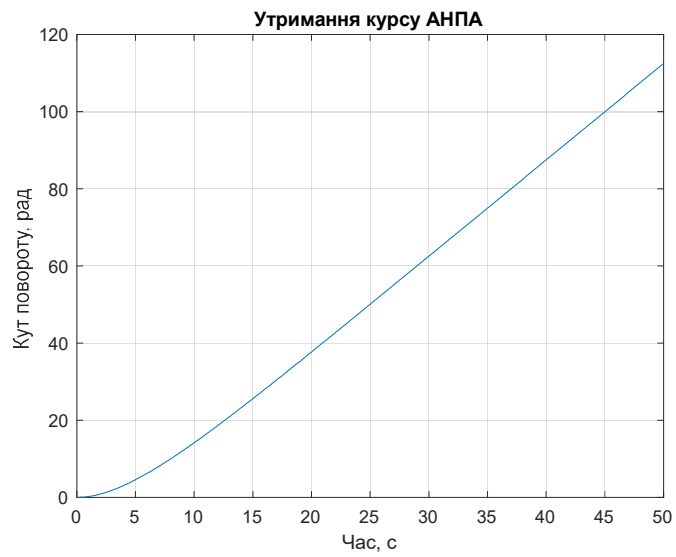
- система стала стабільною (див. рис. 4.4.е та рис. 4.5.г) на відміну від розімкненої системи (див. рис. 4.3.д), що суттєво підвищує її експлуатаційні характеристики;
- час стабілізації на курсі (в точці) зменшився з 30 с (найменше значення для ПД-регулятора) до 7 с (найбільше значення для запропонованого ПД-регулятора);
- тягова потужність рушіїв при маневруванні може при використанні ПД-регулятора бути зменшене для переміщення в точку (стабілізації положення) системи АНПА-КБ-РБ з $P_E = 2800\text{ Н}$ до $P_E = 500\text{ Н}$ без впливу на точність та час позиціонування, що дає змогу зменшити енерговитрати на операцію більше ніж в 2,5 рази;
- загальне зменшення енерговитрат на операцію, що враховує зменшення часу стабілізації та зменшення потужності рушіїв, від провадження ПД-регулятора, складає не менше 10,7 разів.



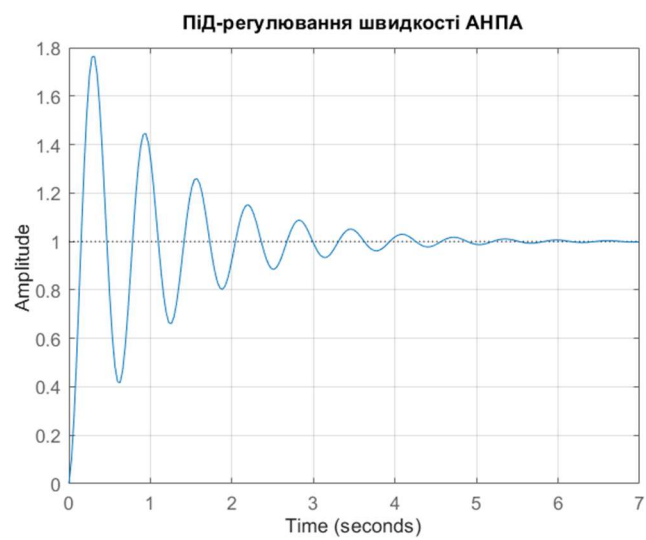
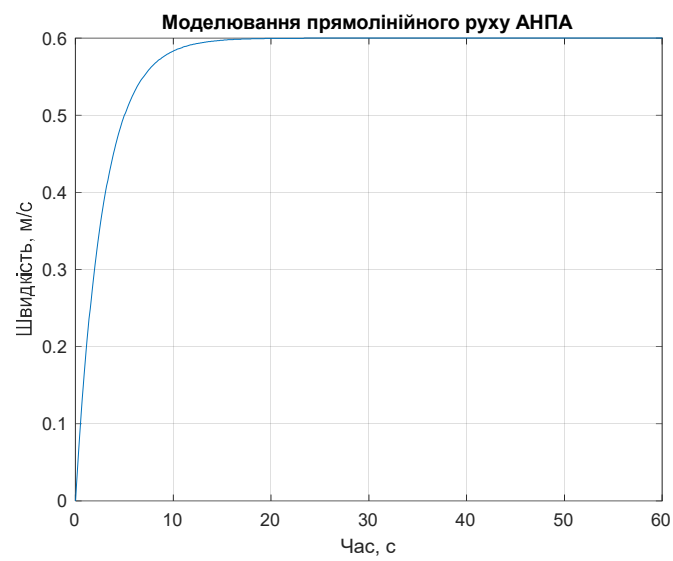
a) $R_x^{nog} = 2500 \text{ H}; P_E = 2800 \text{ H}$



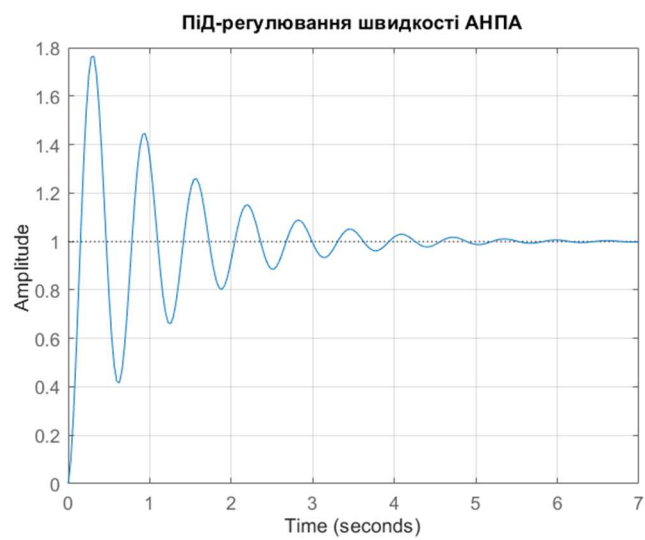
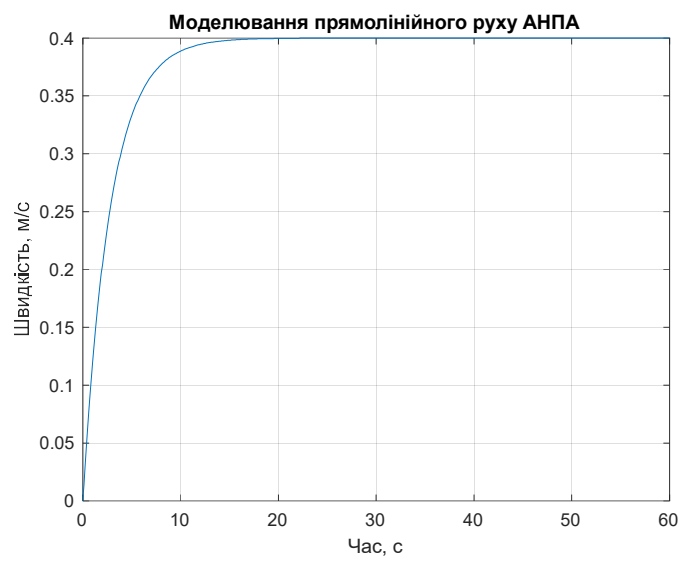
б) $R_x^{нов} = 2500 \text{ Н}; P_E = 2500 \text{ Н}$



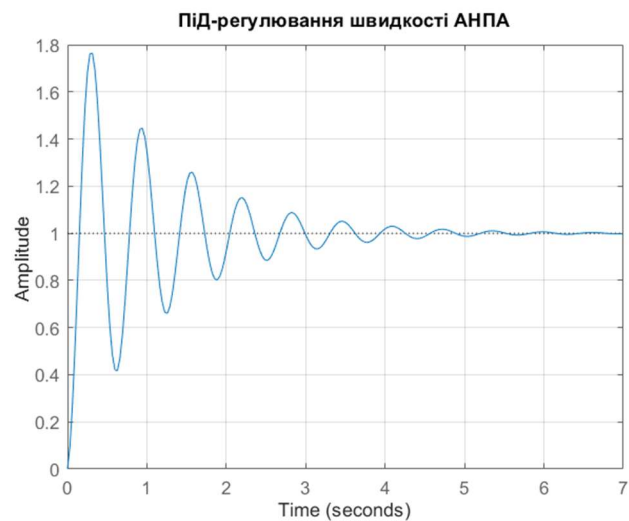
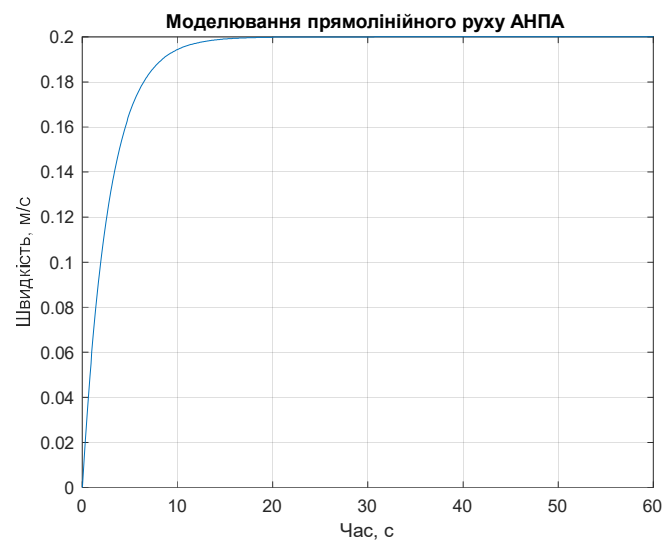
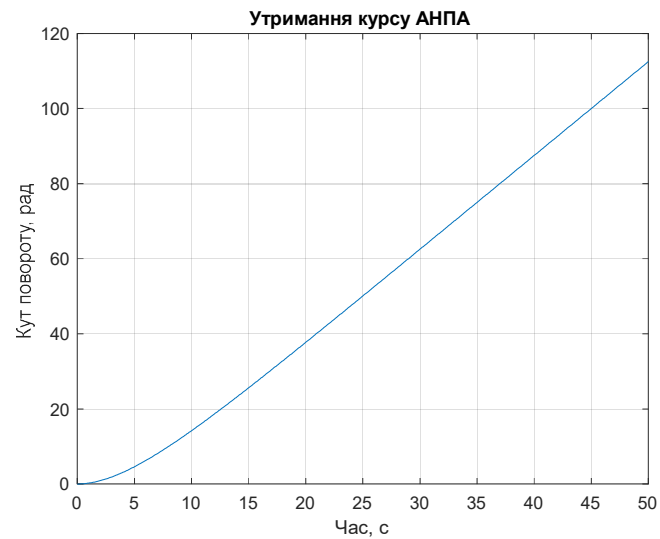
в) $R_x^{nog} = 2500 \text{ H}; P_E = 2000 \text{ H}$



$$\text{г) } R_x^{no\theta} = 2500 \text{ H; } P_E = 1500 \text{ H}$$

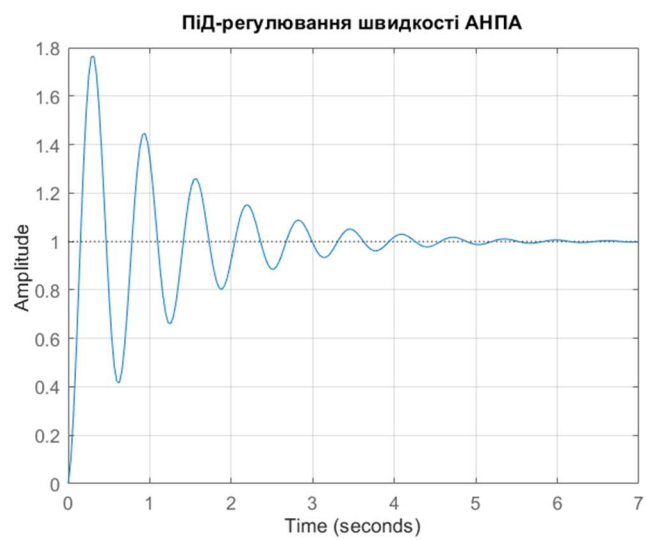
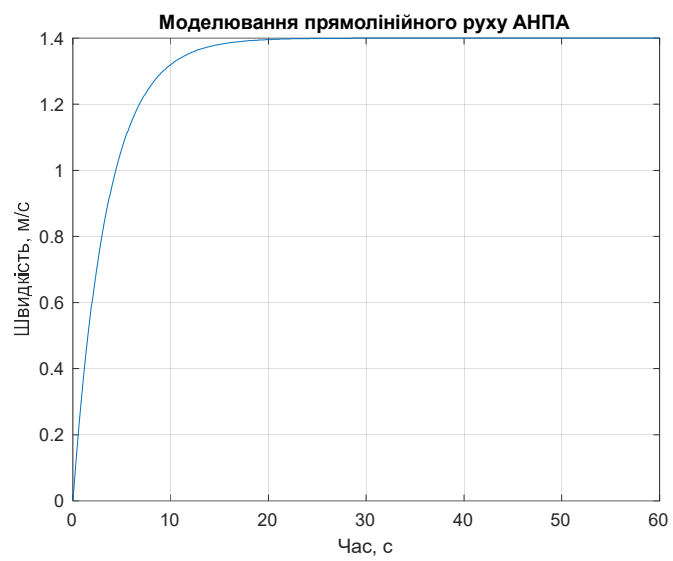


д) $R_x^{нов} = 2500 \text{ Н}; P_E = 1000 \text{ Н}$

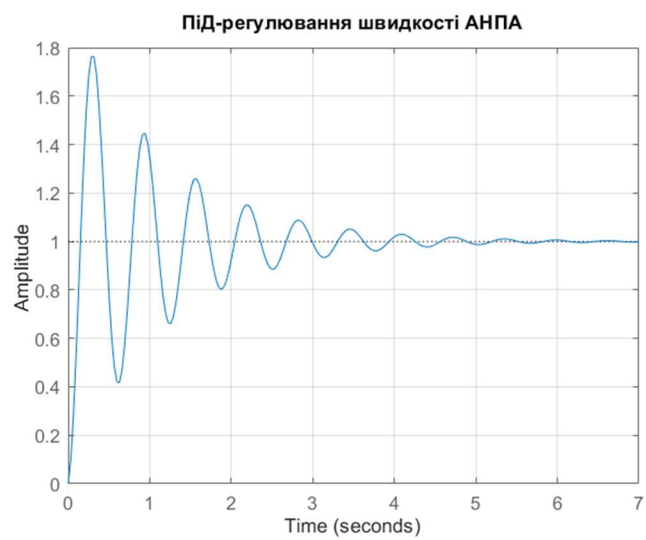
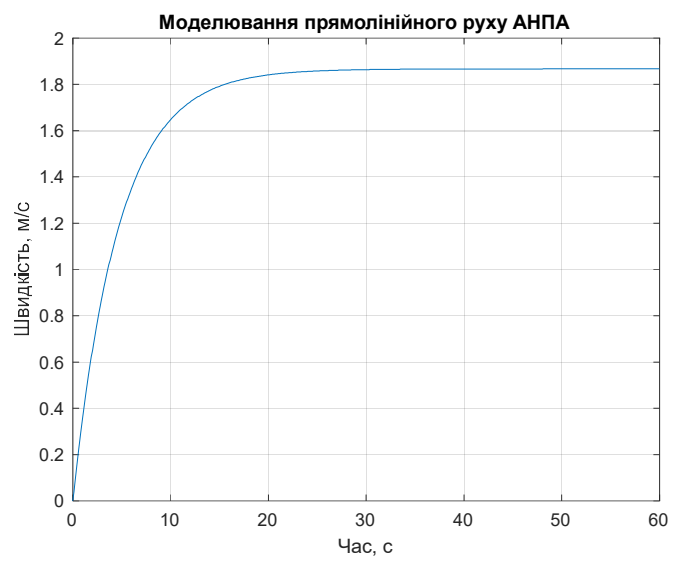


е) $R_x^{nog} = 2500 \text{ Н}$; $P_E = 500 \text{ Н}$

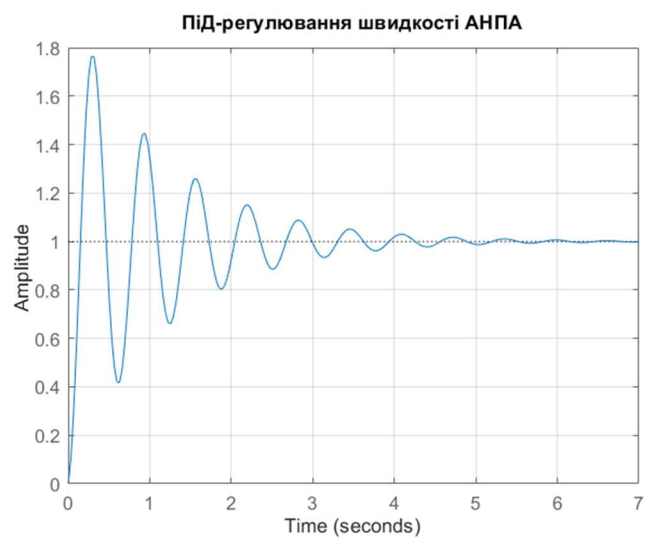
Рисунок 4.4 – Результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на 5 м по курсу при $R_x^{nog} = 2500 \text{ Н} = const$ та $P_E = var$



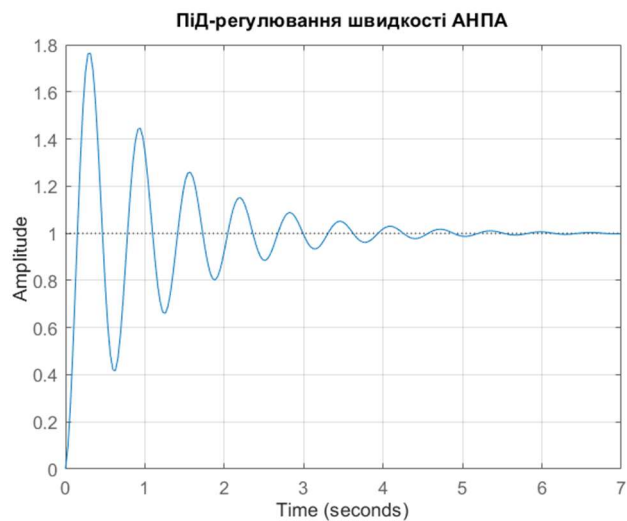
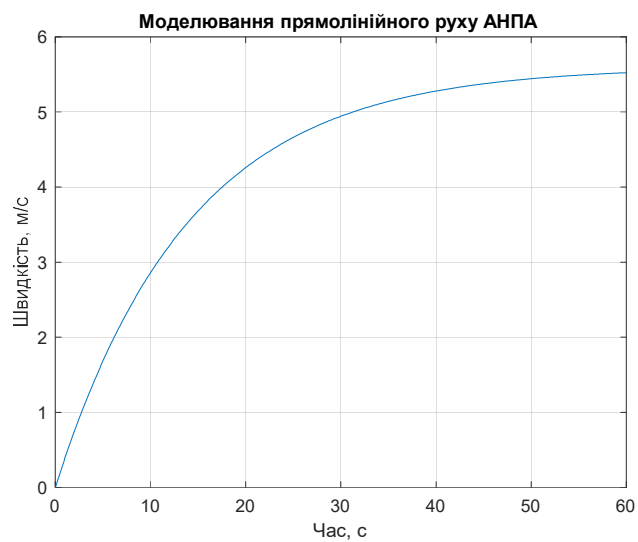
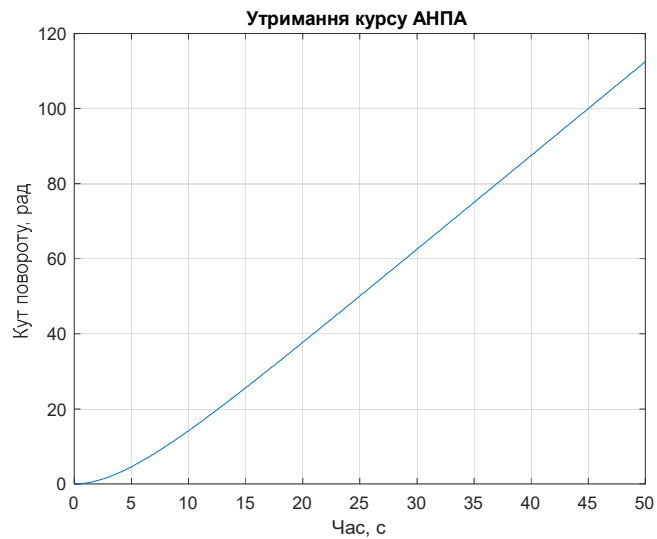
a) $R_x^{nog} = 2000 \text{ H}; P_E = 2800 \text{ H}$



б) $R_x^{ног} = 1500 \text{ Н}; P_E = 2800 \text{ Н}$



в) $R_x^{нов} = 1000 \text{ Н}; P_E = 2800 \text{ Н}$



г) $R_x^{nog} = 1000 \text{ Н}; P_E = 2800 \text{ Н}$

Рисунок 4.5 – Результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на 5 м по курсу при $R_x^{nog} = var$ та $P_E = 2800 \text{ Н} = const$

5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1 Охорона праці користувачів комп'ютерів

При проектуванні та встановленні систем технічного захисту широко використовують персональні комп'ютери (ПК). При цьому, актуальним питанням серед користувачів ПК залишається питання охорони праці [49,50].

Найбільш повним нормативним документом щодо забезпечення охорони праці користувачів ПК є "Державні санітарні норми і правила роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин" ДСанПіН 3.3.2.007-98 [52].

Дотримання вимог цих правил може значно знизити наслідки несприятливої дії на працівників шкідливих та небезпечних факторів, які супроводжують роботу з відеодисплейними матеріалами. Це пов'язано з зоровим і нервово-емоційним напруженням, що виконується у вимушеній робочій позі при локальному напруженні верхніх кінцівок на фоні обмеженої загальної м'язової активності (гіподинамії) під впливом комплексу фізичних факторів шуму, електростатичного поля, неіонізуючих та іонізуючих електромагнітних випромінювань.

Виходячи з цього, організація, яка зібралась спроектувати нашу пропоновану систему, повинна забезпечити гігієнічні й ергономічні вимоги щодо організації робочих приміщень для експлуатації ВДТ, робочого середовища, робочих місць з ВДТ, режиму праці і відпочинку при роботі з ВДТ тощо [51-54].

Порушення санітарно-гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм тягне дисциплінарну, адміністративну, кримінальну відповідальність відповідно до Закону України "Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення" (ст.45, 46, 49) [49].

5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при розробці й експлуатації системи технічного захисту

У нашій системі робота експерта практично повністю зосереджена на комп'ютері. Надійність системи «людина – комп'ютер» значною мірою визначається функціональним станом людини. Психофізіологічні та емоційні перенапруження, втома людини – оператора можуть призвести в комп'ютеризованих системах керування до помилок і як наслідок – до значних економічних втрат.

Визначення та вивчення факторів, що впливають на функціональний стан користувачів комп'ютерів дозволяє виділити основні причини виникнення станів напруженості, стомлення, стресу і здійснити відповідні профілактичні заходи.

На стан людини під час роботи впливають: виробниче середовище, трудовий процес, внутрішні засоби діяльності, зовнішні засоби діяльності та соціально-психологічні фактори. При цьому можна виділити наступні небезпечні та шкідливі фактори [53-57]:

1) Фізичні:

- підвищений рівень шуму на робочому місці (від вентиляторів системного блоку);
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- недостатня концентрація негативних іонів у повітрі робочої зони;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена напруженість електричного поля;
- несприятливий розподіл яскравості в полі зору;
- недостатня освітленість на робочому місці.

2) Хімічні:

- підвищений вміст в повітрі робочої зони пилу, озону, оксидів азоту.

3) Психофізіологічні:

- фізичні перевантаження статичної (опорно-м'язова система) та динамічної (кисті рук) дії;
- нервово-психічні перевантаження, перенапруження зорового аналізатора, розумове перенапруження, монотонність праці, емоційні перевантаження.

4) Професійні захворювання:

- ушкодження зору людини;
- стрес (емоційні переживання, внутрішні напруги, викликані роботою з комп'ютером);
- безсоння;
- головні болі;
- остеохондроз;
- пригнічення імунітету;
- негативний вплив на ендокринну систему і нейрогуморальну реакцію;
- зниження активності гіпофізу;
- порушення уваги та пам'яті;

5) Неприятливі умови мікроклімату

Мікрокліматичні параметри (температура, відносна вологість і швидкість руху повітря) впливають на самопочуття і здоров'я людини, а також на надійність роботи засобів обчислювальної техніки.

Варто враховувати, що ПК, які знаходяться в приміщенні, сприяють збільшенню температури. При підвищеній температурі і вологості в приміщенні відбувається перегрівання тіла, що погіршує самопочуття та впливає на працездатність людини.

5.3 Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого приміщення

Основні вимоги до виробничого приміщення для експлуатації ВДТ [55]:

- воно не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;

- площа на одне робоче місце в такому приміщенні повинна становити не менше 6,0м², а об'єм не менше 20,0 м³;
- воно повинно мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В 2.5.28-2006;
- в ньому мають бути шафи для зберігання документів, дисків, полиці, стелажі, тумби тощо, з урахуванням вимог до площі приміщення;
- щоденно проводити вологе прибирання;
- поруч з приміщенням для роботи з ВДТ мають бути обладнані:
- побутова кімната для відпочинку під час роботи;
- кімната психологічного розвантаження (в таких приміщеннях слід передбачити встановлення пристроїв для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою (СНиП 2.09.04.-87));
- забороняється для оздоблення інтер'єру приміщень ВДТ застосовувати полімерні матеріали (деревинно-стружкові плити, шпалери, що миються, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини;
- приміщення з ВДТ мають бути оснащені аптечками для першої медичної допомоги.

5.3.1 Мікроклімат

Відповідно до встановлених гігієнічно-санітарних вимог (ГОСТ 12.1.005-88, СН 4088-86) [57] організація зобов'язана забезпечити в приміщеннях з ВДТ оптимальні параметри мікроклімату: температури, відносної вологості й рухливості повітря виробничого середовища.

Для нормального теплового самопочуття людини важливо забезпечити певне співвідношення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, тобто певні мікрокліматичні умови. Такі умови визначаються, в основному, категорією роботи, що виконується, та періодом року і можуть бути оптимальними та допустимими (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Норми мікроклімату для приміщень з ВДТ

Пора року	Категорія робіт	t ⁰ C (повітря), не більше	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	Легка – 1а	22,24	4,6	0,1
	Легка – 1б	21,23	4,6	0,1
Тепла	Легка – 1а	23,25	4,6	0,1
	Легка – 1б	22,24	4,6	0,2

Під оптимальними мікрокліматичними умовами розуміють таке співвідношення його параметрів, при якому в умовах тривалої та систематичної дії на людину створюються комфортні теплові відчуття та відбувається збереження нормального теплового стану організму без напруження механізмів терморегуляції. Допустимі мікрокліматичні умови передбачають можливість виникнення дискомфортних почуттів та зміни теплового стану організму, однак вони швидко минають і нормалізуються за рахунок напруження механізмів терморегуляції в межах фізіологічних пристосувальних можливостей.

До категорії 1а належать роботи, що виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження, при яких витрати енергії складають до 139 Вт, а до категорії 1б – роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням, при яких витрати енергії становлять від 140 до 174 Вт.

Для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов в будь-який період року приміщення, в яких розташовані комп'ютеризовані робочі місця повинні бути обладнані системами опалення. Однак найкраще вирішення цього питання – це встановлення кондиціонерів, які автоматично підтримують задані параметри мікроклімату.

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ВДТ мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам № 2152-80 (дод.3) (див. табл.5.2).

Таблиця 5.2 – Рівні іонізації повітря при роботі на ВДТ

Рівні	Число іонів в 1см ³ повітря	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-30000	3000-5000
Максимально допустимі	50000	50000

Необхідні концентрації позитивних та негативних іонів в повітрі робочих зон можна забезпечити застосуванням:

- генераторів негативних іонів;
- установок штучного зволоження;
- кондиціонерів;
- примусової вентиляції (провітрювання, системи загально обмінної припливно-витяжної вентиляції, пристрої місцевої вентиляції);
- захисних екранів, що заземлені.

5.3.2 Освітлення

У забезпеченні максимально комфортних умов зорової роботи вагома роль належить оптимізації кількісних та якісних показників освітлення [58].

Освітленість на робочому місці повинна відповідати характеру зорової роботи, який визначається трьома параметрами: об'єктом розрізнення – найменшим розміром об'єкта, що розглядається на моніторі ПК; фоном, який характеризується коефіцієнтом відбиття; контрастом об'єкта і фону.

Необхідно забезпечити достатньо рівномірне розподілення яскравості на робочій поверхні монітора, а також в межах навколишнього простору. На робочій поверхні повинні бути відсутні різкі тіні. Величина освітленості повинна бути постійною під час роботи. Слід обирати оптимальну спрямованість світлового потоку і необхідний склад світла.

Зазначення освітлення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300-500 лк. Якщо ці значення норми освітленості неможливо забезпечити системою загального освітлення,

допускається використовувати місцеве освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрана (це може викликати осліплення), а освітленість екрана має не перевищувати 300 лк.

Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50° до 90° з вертикаллю в повздовжній та поперечній площині має становити не більше ніж 200 кд/м^2 , захисний кут світильників – не менше ніж 40° .

Необхідно обмежувати інтенсивність відблисків на робочих поверхнях відносно джерел природного і штучного освітлення. При цьому яскравість відблисків на екрані ВДТ має не перевищувати 40 кд/м^2 , а яскравість стелі в разі застосування системи відбитого освітлення 200 кд/м^2 .

5.3.3 Шум та вібрація

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, обладнаних ВДТ комп'ютерів, мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-83, ГР 2411-81 [53].

Відомо, що шум несприятливо діє на слуховий аналізатор та інші органи та системи організму людини. Суттєве значення щодо такої дії має інтенсивність шуму, його частотний склад, тривалість щоденного впливу, індивідуальні особливості людини, а також специфіка виробничої діяльності. Ті види діяльності, у яких поєднується напружена розумова робота та інтенсивне використання комп'ютера (редагування тексту, верстка оригіналу, "запуск" та відлагодження програм тощо) характеризується відчутним впливом навіть незначних рівнів шуму. Цей вплив виражається у зниженні розумової працездатності, швидкій втомлюваності, послабленні уваги, появі головного болю та ін.

При значних шумах та вібраціях слід притримуватись наступним вимогам:

- устаткування, що становить джерело шуму (АЦП, принтери тощо), слід розташовувати поза приміщенням для роботи ВДТ;

- на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має буди обґрунтований спеціальними інженерно-акустичними розрахунками;
- іонізуючі електромагнітні випромінювання на відстані 0,05 м від екрана до корпусу відеотермінала при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинна перевищувати $7,74 \cdot 10^{-12}$ А/кг, що відповідає еквівалентній дозі 0,1 мБер/год (100 мкР/год) НРБУ № 58.

5.3.4 Гігієнічні вимоги до організації і обладнання робочих місць

Обладнання і організація робочого місця працюючих з ВДТ мають забезпечувати відповідність конструкції всіх елементів робочого місця (ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 22.269-76, ГОСТ 21.889-76).

Гігієнічні норми передбачають наступне:

- конструкція робочого місця користувача має забезпечити підтримання оптимальної робочої пози;
- робочі місця з ВДТ слід так розташовувати відносно світових прорізів, щоб природнє світло падало збоку переважно зліва;
- при розміщенні робочих столів з ВДТ слід дотримувати такі відстані між бічними поверхнями ВДТ 1,2 м, відстань від тильної поверхні одного ВДТ до екрана іншого ВДТ – 2,5 м;
- конструкція робочого столу має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів;
- висота робочої поверхні робочого столу з ВДТ має регулюватися в межах 680...800 мм, а ширина і глибина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800..1000 мм);
- робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги – ніж 650 мм;
- робочий стілець має бути підйомно-поворотним, регульованим за висотою, з кутом і нахилом сидіння та спинки і за відстанню від спинки до

переднього краю сидіння поверхня сидіння має бути плоскою, передній край – заокругленим. Регулювання за кожним із параметрів має здійснюватися незалежно, легко і надійно фіксуватися. Крок регулювання елементів стільця має становити: для лінійних розмірів – 15...20 мм, для кутових 2...5 град. Зусилля регулювання має не перевищувати 20 Н;

- висота поверхні сидіння має регулюватися в межах 400...500 мм, а ширина і глибина становити не менше ніж 400 мм. Кут нахилу сидіння – до 15 град. вперед і до 5 град. назад;

- висота спинки стільця має становити (300 ± 20) мм, ширина – не менше ніж 380 мм, радіус кривизни горизонтальної площини – 400 мм. Кут нахилу спинки має регулюватися в межах 1...30 град. від вертикального положення. Відстань від спинки до переднього краю сидіння має регулюватися в межах 260...400 мм;

- для зниження статичного напруження м'язів верхніх кінцівок слід використовувати стаціонарні або змінні підлокітники завдовжки не менше ніж 250 мм, завширшки 50...70 мм, що регулюються за висотою над сидінням у межах 230...260 мм і відстанню між підлокітниками в межах 350...500 мм;

- екран ВДТ має розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600...700 мм, але не ближче ніж за 600 мм з урахуванням розміру літерно-цифрових знаків і символів.

5.3.5 Вимоги до режимів праці і відпочинку при роботі з ВДТ

При організації праці, що пов'язана з використанням ВДТ, для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійних захворювань і підтримки працездатності слід передбачити внутрішньозмінні регламентовані перерви для відпочинку.

Внутрішньозмінні режими праці і відпочинку мають передбачати додаткові нетривалі перерви в періоди, що передують появі об'єктивних і суб'єктивних ознак втомлення і зниження працездатності.

При виконанні протягом дня робіт, що належать до різних видів трудової діяльності, за основну роботу слід вважати таку, що займає не менше 50% часу впродовж робочої зміни мають передбачатися:

- перерви для відпочинку і вживання їжі (обідні перерви);
- перерви для відпочинку і особистих потреб (згідно з трудовими нормами).

За характером трудової діяльності є розробники програм (інженери-програмісти) – виконують роботу переважно з відеотерміналом та документацією при необхідності і інтенсивного обміну інформацією з ЕОМ і високою частиною прийняття рішень. Робота характеризується інтенсивною розумовою творчою працею з підвищеним напруженням зору, концентрацією уваги на фоні нервово-емоційного напруження, вимушеною робочою позою, загальною гіподинамією, періодичним навантаженням на кисті верхніх кінцівок. Робота виконується в режимі діалогу з комп'ютером у вільному темпі з періодичним пошуком помилок в умовах дефіциту часу та оператори електронно-обчислювальних машин, які виконують роботу, яка пов'язана з обліком інформації, одержаної з ВДТ за попереднім запитом, або тієї, що надходить з нього, супроводжується перервами різної тривалості, пов'язана з виконанням іншої роботи і характеризується як робота з напруженням зору, невеликими фізичними зусиллями, нервовим напруженням середнього ступеня та виконується у вільному темпі.

Першим слід призначати (при 8-ми годинній робочій зміні) регламентовану перерву для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожну годину роботи за ВДТ, другим – кожні дві години. У всіх випадках, коли виробничі обставини не дозволяють застосувати регламентовані перерви, тривалість безперервної роботи з ВДТ не повинна перевищувати 4 години.

З метою зменшення негативного впливу монотонності є доцільним застосовувати чергування операцій усвідомленого тексту і числових даних (зміна змісту роботи), а саме почергове здійснення вводу даних та редагування текстів.

Рекомендується активний відпочинок, він полягає у виконанні комплексу гімнастичних вправ, спрямованих на зняття нервового напруження, м'язове розслаблення, відновлення функцій фізіологічних систем, що порушуються протягом трудового процесу, зняття втоми очей, поліпшення мозкового кровообігу і працездатності.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено дослідження системи автоматизованого управління автономного підводного апарата з радіобуєм (АНПА РБ), призначеного для виконання завдань гуманітарного розмінування водних акваторій.

В результаті дослідження отримані наступні результати:

1) В роботі проведено аналіз існуючих підводно-технічних систем та засобів підводної робототехніки що дозволило сформулювати основні вимоги до таких систем, що можуть бути задіяні для виконання задач гуманітарного розмінування.

2) Проведено аналіз умов експлуатації АНПА в акваторіях України та показано що для виконання задач гуманітарного розмінування, з урахуванням безпеки операторів АНПА та умов і часу використання апаратів, є доцільним використання системи АНПА-КБ-РБ.

3) Проведено формалізацію задачі управління системою АНПА–КБ-РБ з урахуванням математичного моделювання руху твердого тіла у воді. Пропонуються класичні методики регулювання (ПД-регулятор) з подальшим розглядом адаптивних та інтелектуальних підходів, у тому числі із застосуванням нечіткої логіки та елементів машинного навчання..

4) У середовищі MATLAB/Simulink розроблена модель руху АНПА у горизонтальній площині при умовах врахування гідродинамічного опору, яка дозволила дослідити динаміку системи та перевірити стійкість вибраної структури регулятора.

5) Аналіз ефективності запропонованої автоматизованої системи керування на ПД-регуляторі дає загальне зменшення енерговитрат на операцію (перехід в точку/стабілізація в точці), що враховує зменшення часу стабілізації та зменшення потужності рушіїв, від провадження ПД-регулятора, складає не менше 10,7 разів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ООН оголосила десятиліття наук про океан.
https://lb.ua/society/2017/12/06/383994_oon_obyavila_desyatiletie_nauk.html
2. Указ Президента України від 20 серпня 2021 року № 372/2021 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 18 червня 2021 року «Про Стратегію розвитку оборонно-промислового комплексу України». Urs:
<https://www.president.gov.ua/documents/3722021-39733>
3. REMUS 300M. Unmanned Underwater Vehicle. MINE COUNTERMEASURES VARIANT [Назва з екрану] – Urs:
https://bluezonegroup.com.au/wp-content/uploads/2022/08/REMUS-300M-3-31-22_web.pdf
4. Криголам “Ноосфера”. Urs: <http://uac.gov.ua/icebreaker-noosphere/>
5. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2021-2030 роки. Міністерство освіти і науки України, 2020. 71 с. Urs:
<https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku-vishchoiosviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf>
6. Fossen, T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. – Wiley, 1994.
7. Rudnick, D.L., Sherman, J.T. Underwater Gliders for Ocean Research. – Marine Technology Society Journal, Vol. 38, No. 2, 2004.
8. Åström, K.J., Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – Instrument Society of America, 1995.
9. Gertler, J.J. Navy Mine Countermeasures: Background and Issues for Congress. – Congressional Research Service, 2013.
10. Yoerger, D.R., Jakuba, M.V., German, C.R., Bingham, B. Autonomous and remotely operated vehicle technology for hydrothermal vent discovery, exploration, and sampling. – Oceanography, Vol. 20, 2007.
11. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. – Information and Control, Vol. 8, 1965.

12. Hyland, C., Plant, J., Crowther, D. Application of Autonomous Underwater Vehicles to Mine Countermeasure Missions. – Journal of Defense Technology, 2016.
13. MathWorks. MATLAB & Simulink Documentation. – <https://www.mathworks.com/help/>
14. Dijkstra, J.J. Modeling and Control of Autonomous Underwater Vehicles. – TU Delft, 2011.
15. Кудрявцев А.Ф., Котельников А.І. Підводні робототехнічні комплекси - Київ: НАУ, 2019.
16. Ягельський С.Р., Козлов Д.М. Інформаційні технології в підводній робототехніці. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020.
17. Гусєв В.В. Теорія автоматичного керування. – Київ: Каравела, 2018.
18. Висоцький В.І., Мосін О.В. Автоматизовані системи керування. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2017.
19. Мороз В.М. Основи моделювання динамічних систем. – Київ: НАУ, 2015.
20. Мазур С.М., Василенко О.М. Робототехніка. – Київ: Видавництво КНУБА, 2016.
21. Underwater Inspection and Monitoring Technologies for Autonomous Operations // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine PP (99):1-10 – DOI:10.1109/MAES.2024.3366144.
22. STANAG 1364 – NATO Standardization Agreement for Mine Countermeasures.
23. Ukraine Naval Doctrine 2035. – Ministry of Defense of Ukraine, 2021.
24. Kongsberg Maritime (підводна техніка та гідролокатори) [назва з екрану]. url: <https://www.kongsberg.com>
25. Teledyne Marine Systems (REMUS, Gavia, SeaBotix). [назва з екрану]. url: <https://www.teledynemarine.com>
26. NATO Maritime Mine Countermeasures Concepts. – NATO Allied Maritime Command.

27. Sonar Systems and Underwater Signal Processing – Springer, 2013.
28. Сучасні технології розмінування. – Журнал «Оборонні технології», №1, 2022.
29. Guidelines for Humanitarian Mine Action. – Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD).
30. Технічне завдання на АПА. – внутрішній документ кафедри автоматизації (НУК), 2024.
31. Програма розвитку ОБТ для ВМС України – Наказ Міноборони №72/2023.
32. MATLAB Central File Exchange – Приклади моделювання динаміки AUV.
33. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations – The National Academies Press, 2005.
34. Data Fusion for Mine Countermeasure Operations – Office of Naval Research, 2017.
35. International Mine Action Standards (IMAS). – United Nations Mine Action Service (UNMAS).
36. Guidelines for Control System Design. – IFAC Technical Committee, 2018.
37. Рекомендації до оформлення кваліфікаційних робіт – НУК ім. адм. Макарова, 2023.
38. Стратегія протимінної діяльності України – Уряд України, 2022.
39. Положення про безпеку водолазних робіт – Мінінфраструктури України, 2021.
40. Технічна документація REMUS 100 – Hydroid Inc., 2020.
41. Блінцов О. В., Надточій В. А. Автоматизація керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами: на вчальний посібник. Миколаїв: Вид-во НУК, 2014. 124 с.
42. Сіривчук А. С. Синтез регулятора позиціонування підводного апарата пошукового типу. Підводна техніка і технологія: матеріали IX

Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: у 2 ч. Миколаїв: НУК, 2019. Ч. 1. С. 52–55.

43. Сірівчук А. С. Модуль автоматизованого прокладання маршруту при різних задачах моніторингу підводного середовища. Інновації в 175 суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VI міжнародної науково технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2015. С. 330–331.

44. Сірівчук А. С. Розробка модуля керування траєкторією руху для симулятора тривимірного руху підводного апарата. Проблеми автотехніки та електрообладнання транспортних засобів: матеріали міжнарод. наук.-техн. конференції. Миколаїв, 2015. С. 58–59.

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

46. Войткунський Я.І. Довідник з теорії корабля. Л., Суднобудування, 1985.

47. Гідродинамічний розрахунок самохідних підводних апаратів [Текст]: навч. посібник по курсовому та дипломному проектуванню для спец. «Кораблі і океанотехніка» / Н. Б. Сліжевський [та ін.]; ред. Н. Б. Сліжевський ; Український держ. морський технічний ун-т ім. С.О. Макарова. Миколаїв: УДМТУ, 2000. 94 с.

48. NASA 0012 AIRFOILS - NASA 0012 airfoil [назва з екрану]. url: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>

49. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 р. із змінами, внесеними згідно із Законами в редакції від 12.02.2015 р.

50. Кодекс законів про працю в Україні від 10.12.1971 із змінами, внесеними згідно із Законами в редакції від 18.03.2015 р.

51. ГОСТ 12.0.001-82. Система стандартів безпеки праці. Загальні вимоги до управління охороною праці в організації

52. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартів безпеки праці. Терміни та визначення..

53. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація
54. ДСанПІН 3.3.2.007-98 Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин.
55. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин (від 26.03.2010)
56. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень
57. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони
58. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення
59. Sabertooth. The intelligent transformative robotic system. <https://www.saabseaeye.com/solutions/underwater-vehicles/sabertooth-single-hull>
60. Falcon. The professional portable underwater vehicle. <http://saabseaeye.com/solutions/underwater-vehicles/falcon>
61. PLUTO GIGAS ROV <https://www.gaymarine.it/en/products/rov-pluto-gigas>
62. LAUV – One-man portable and Cost Effective AUV. Light Autonomous Underwater Vehicle <https://www.oceanscan-mst.com/>
63. Сірівчук О.І. *Математичне моделювання руху підводних апаратів*. — Київ: Техніка, 2021. — 256 с.
64. Сірівчук О.І., Васильєв О.Г. *Моделювання систем керування підводних апаратів*. — Одеса: Морська справа, 2019. — 148 с.
65. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers // *Transactions of the ASME*. — 1942. — Vol. 64. — P. 759–768.
66. Астапов Ю.І. *Автоматичне керування. Теорія та практика ПІД-регулювання*. — Львів: Видавництво ЛНУ, 2018. — 312 с.
67. Мамдун А. *Нечітка логіка в управлінні технічними системами*. — Харків: ХНУРЕ, 2020. — 194 с.

68. Jantzen J. *Foundations of Fuzzy Control*. — Wiley, 2007. — 380 p.
69. Технічний паспорт АНПА Гр.Мк1. — ДКР, НДР №2359, 2024.
70. Кравченко М.В. *Інтелектуальні системи стабілізації руху мобільних об'єктів*. — Миколаїв: НУК, 2022. — 132 с.
71. Пархоменко С.В., Мельничук А.М. *Основи нечіткого регулювання*. — Київ: Політехніка, 2017. — 188 с.

ДОДАТОК А
Мультимедійна презентація

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Нужний Іван Сергійович
Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:

" Дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування "

Керівник роботи – Васильєв О.Г.

Слайд 1 мультимедійної презентації

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Актуальність теми.

Актуальність для України, мають розробки АНПА, які призначені для гуманітарного розмінування акваторій – знешкодження морських мін та затонулих боєприпасів.

Мета роботи – дослідження системи автоматизованого керування автономного підводного апарата з радіобуєм для задач гуманітарного розмінування.

Задачі роботи:

1. Провести аналіз сучасних засобів підводної робототехніки, що застосовуються для гуманітарного розмінування.
2. Визначити специфічні умови експлуатації АНПА з радіобуєм в акваторіях України.
3. Побудувати математичну модель руху автономного підводного апарата.
4. Виконати моделювання роботи системи керування в середовищі MATLAB/Simulink.
5. Провести аналіз ефективності регуляторів та оптимізувати їх параметри.

Об'єктом дослідження є процес управління складними підводними об'єктами в просторовому полі.

Предмет дослідження – методика розробки системи автоматичної стабілізації руху по заданій траскторії та просторового положення автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм.

Методи дослідження: Під час проведення досліджень використовувалися базові положення методів математичного моделювання, статистичного аналізу, абстрагування і формалізації. Застосовувалися методи експертного аналізу.

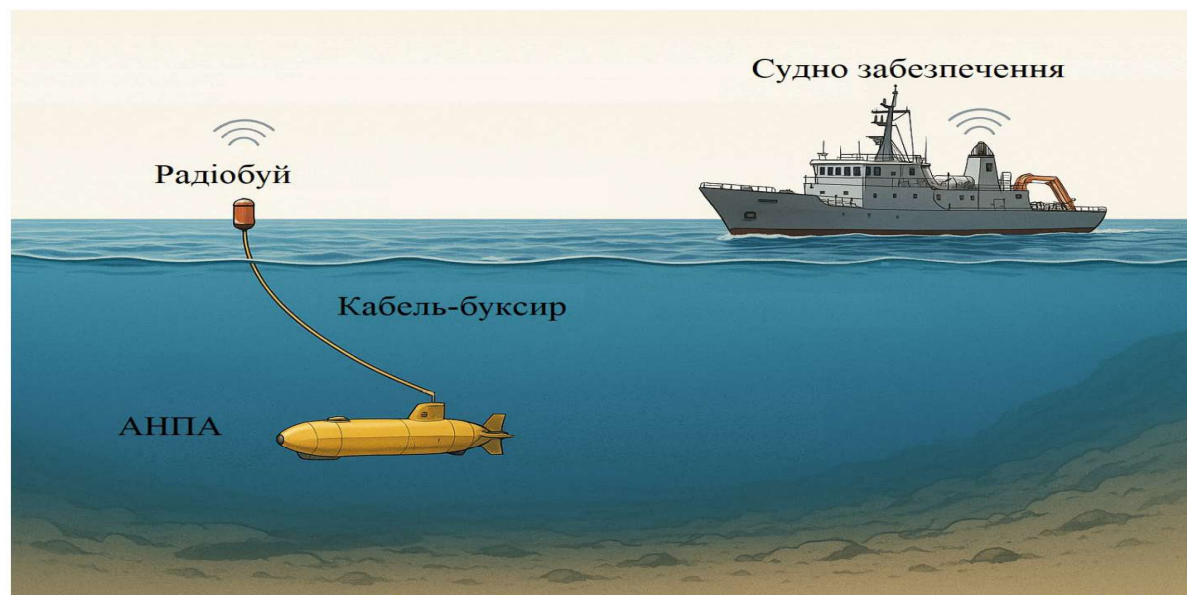
Робота виконана в рамках з ДКР 2359 «Розробка конструкторської документації на створення засобів підводної робототехніки» (ДСК).

Слайд 2 мультимедійної презентації

ПІДВОДНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Автономний ненаселений підводний апарат (АНПА) входить до складу підводно-технічного комплексу (ПТК). До складу ПТК входять:

- АНПА;
- кабель-буксир;
- радіобуй;
- судно забезпечення.



підводно-технічного комплексу (ПТК) для гуманітарного розмінування

Слайд 3 мультимедійної презентації

Технічні характеристики комплексу АНПА Гр.Мк1

Регіон роботи мілководний морський шельф, природні та штучні водойми

Робоча глибина, не більше, м 30

Рівень хитавиці, не більше, балів 3

Дальність радіозв'язку, на більше, м:

- канал WiFi 400
- канал супутникового зв'язку не обмежений

Швидкість руху, не більше, вузлів / м/с:

- в режимі обстеження 5 / 2,5
- в режимі ідентифікації 2 / 1,0

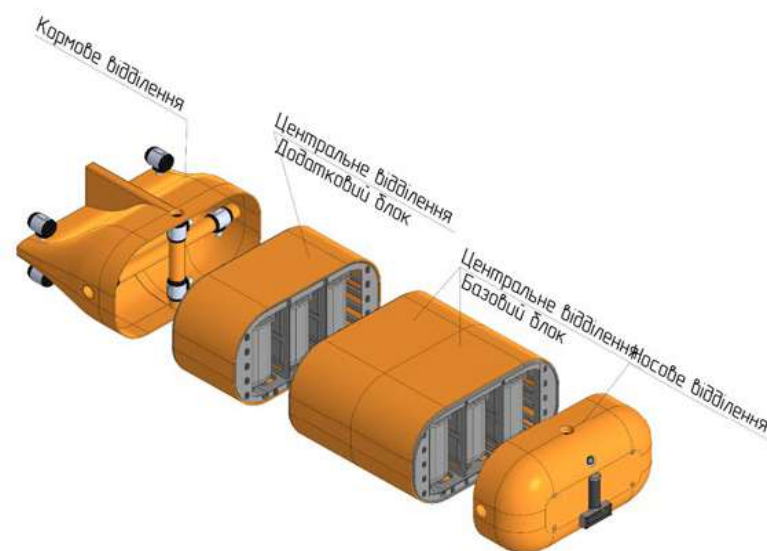
Орієнтовний час роботи, не менше, год 3

Габарити(В×Ш×Д), не більше, мм:

- АНПА (базова комплектація) 800×1410×2500
- АНПА з додатковим модулем 800×1410×3100

Вага, не більше, кг:

- АНПА (базова комплектація) 700
- АНПА з додатковим модулем 1000

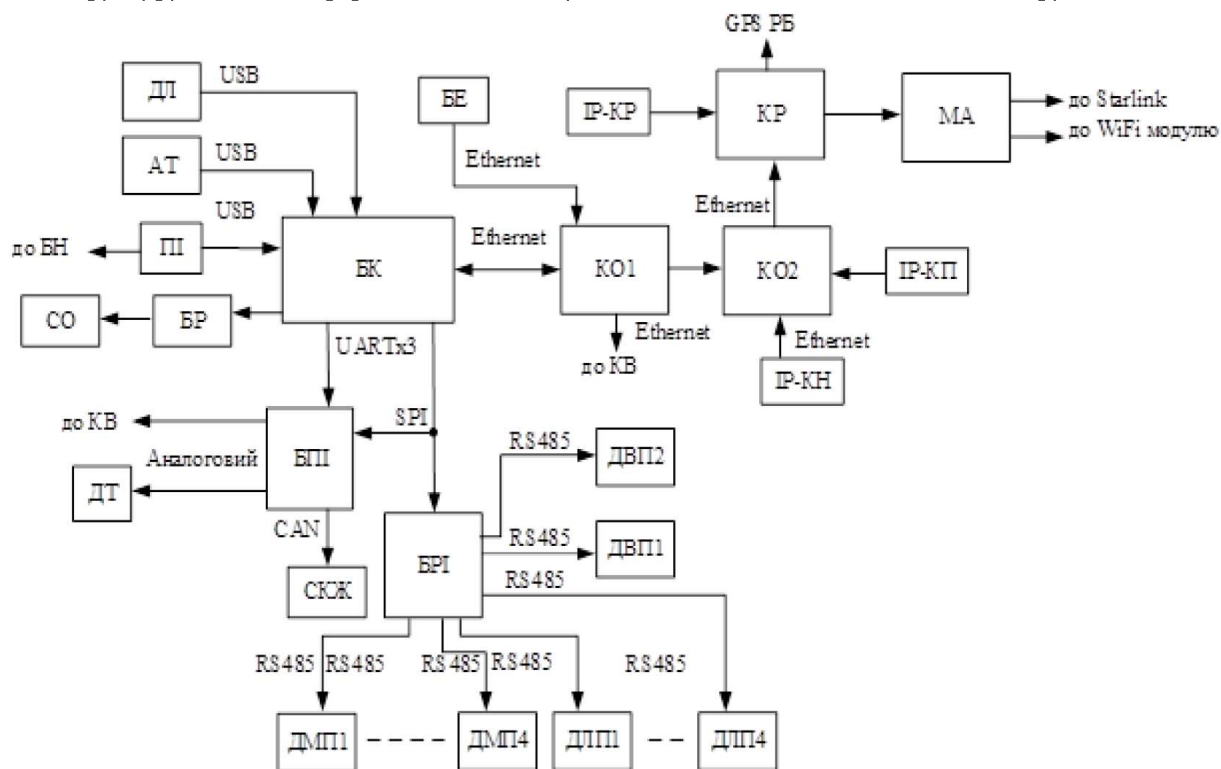


автономний ненаселений підводний апарат (АНПА)
гуманітарного розмінування Mk1

Слайд 4 мультимедійної презентації

Система автоматичного керування

Система автоматичного керування концентрує в собі всю поточну інформацію про стан систем апарата, його географічне положення і відомості про оточуюче середовище. Дана інформація повинна оброблятися в розрахунковому модулі та формувати відповідні сигнали керування виконавчими механізмами. Тому структурна схема система автоматизованого керування являє собою структуру системи інформаційного обміну АНПА. Система автоматизованого керування складається:

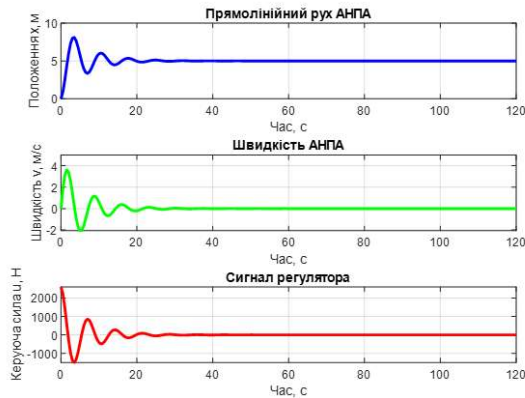


- БК – бортовий комп'ютер;
- БПІ – блок перетворення інтерфейсів;
- ПІ – перетворювач інтерфейсу USB-RS232
- РІ – розширювач інтерфейсу

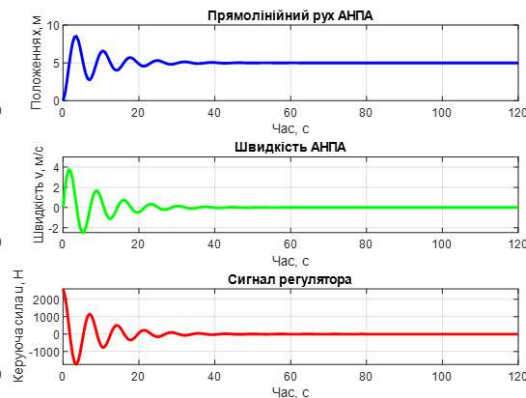
На схемі прийняті наступні позначення:

- АТ– альтиметр;
- БЕ– багатопроменевий ехолот;
- БН– блок навігації;
- БР– блок реле;
- БРІ– блок розширення інтерфейсів;
- ДЛ– доплеровий лаг;
- ДВП 1-2– драйвер вертикального приводу
- ДМП 1-4– драйвер маршового приводу, де 1-4 номер приводу;
- ДЛП 1-4– драйвер лагового приводу, де 1-4 номер приводу;
- ДТ– датчик тиску;
- ІР-КН– навігаційна ІР-камера;
- ІР-КП– пошукова ІР-камера;
- ІР-КР– ІР-камера радіобуя;
- КО1,2– бортовий Ethernet комутатор;
- КР– Ethernet комутатор радіобуя;
- МА– маршрутизатор;
- СО– система освітлення;
- СКЖ– система керування живленням.

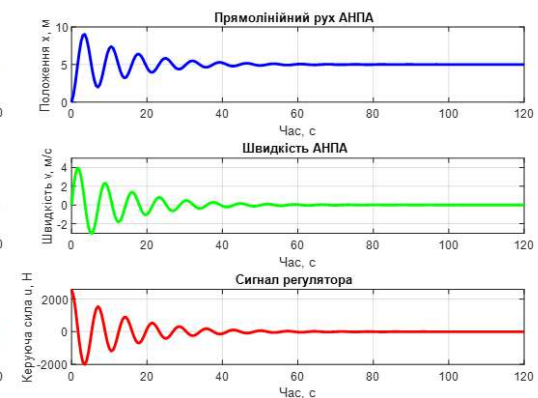
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ



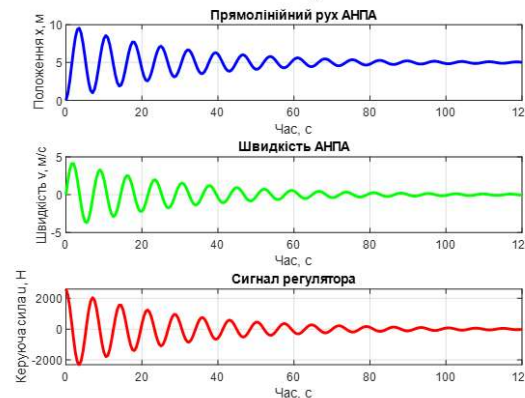
$$A) R_x^{nov} = 2500\text{H}$$



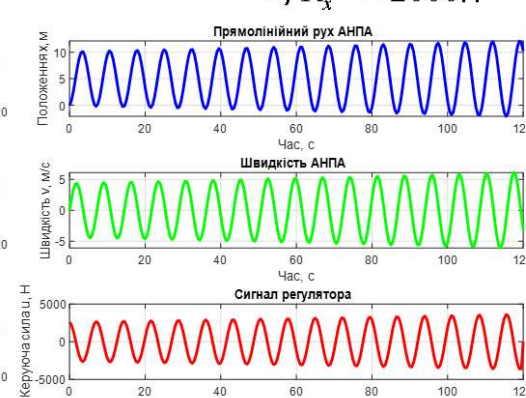
$$B) R_x^{nov} = 2000\text{H}$$



$$B) R_x^{nov} = 1500\text{H}$$



$$Г) R_x^{nov} = 1000\text{H}$$



$$Д) R_x^{nov} = 500\text{H}$$

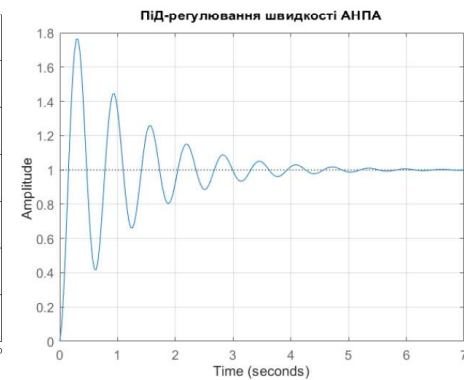
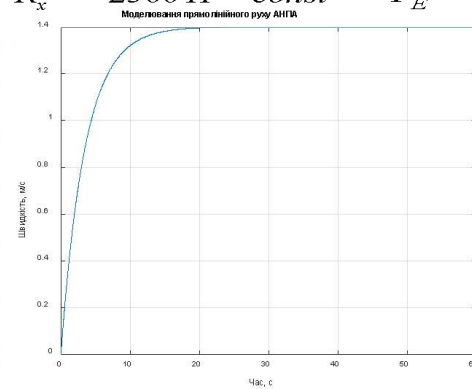
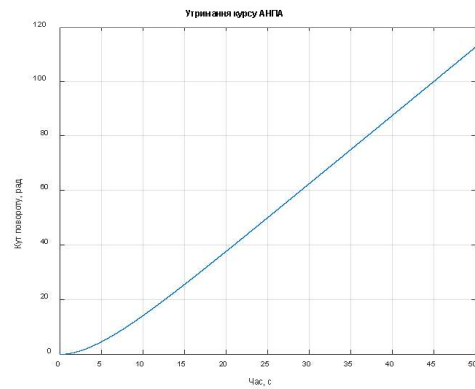
ПІ-регулятор
Виконання команди
переміщення АНПА
(позиціонування) на 5 м по курсу

Слайд 6 мультимедійної презентації

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

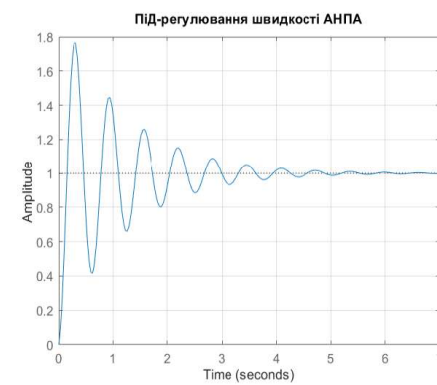
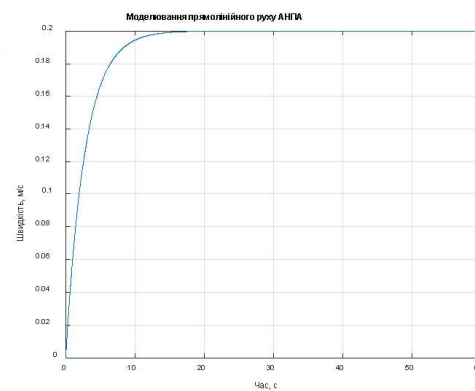
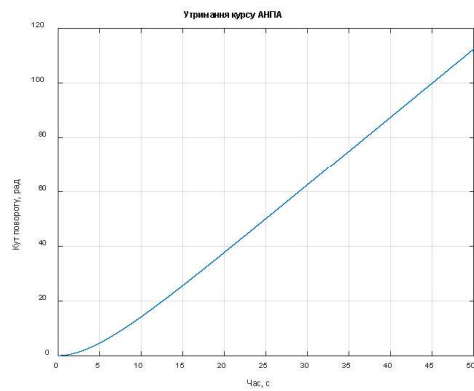
Результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) (ПД-регулятор) на 5 м по курсу при

$$R_x^{nov} = 2500 \text{ H} = \text{const} \text{ та } P_E = \text{var}$$



$$R_x^{nov} = 2500 \text{ H}$$

$$P_E = 2800 \text{ H}$$



$$R_x^{nov} = 2500 \text{ H}$$

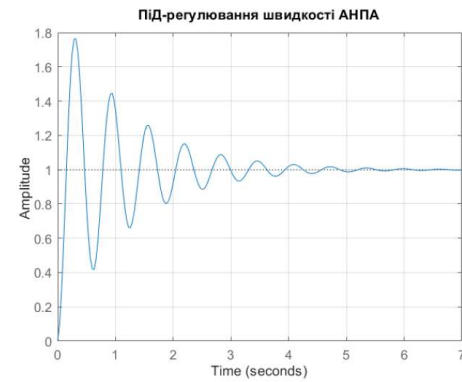
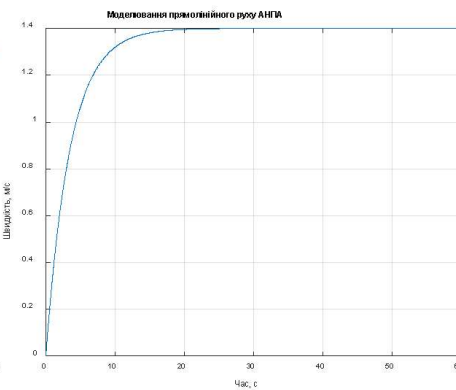
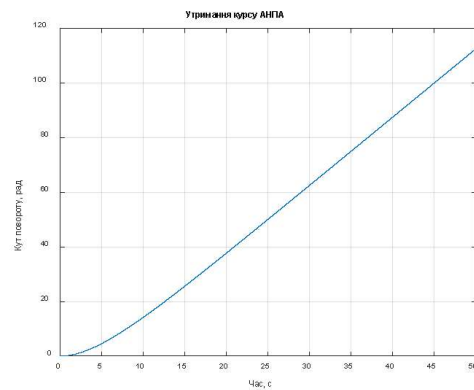
$$P_E = 500 \text{ H}$$

Слайд 7 мультимедійної презентації

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

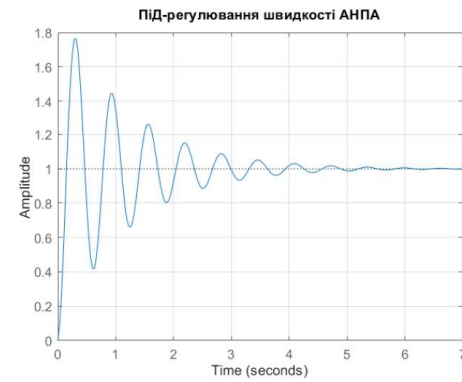
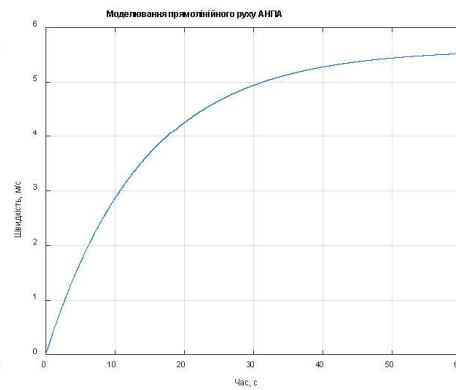
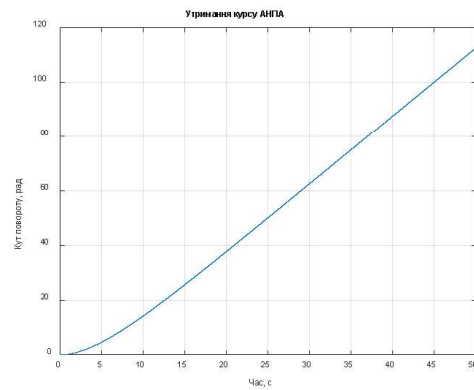
Результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на 5 м по курсу при

$$R_x^{nov} = var \text{ та } P_E = 2800 H = const$$



$$R_x^{nov} = 2000 H$$

$$P_E = 2800 H$$



$$R_x^{nov} = 1000 H$$

$$P_E = 2800 H$$

Слайд 8 мультимедійної презентації

Висновки

У кваліфікаційній роботі здійснено дослідження системи автоматизованого управління автономного підводного апарата з радіобуєм (АНПА РБ), призначеного для виконання завдань гуманітарного розмінування водних акваторій.

В результаті дослідження отримані наступні результати:

- результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на фіксований крок 5 м по курсу при швидкості течії 2 вузли та зміні опір повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ (потужності маршових рушіїв). на положення апарату впливає течія та інерційні параметри кабель-буксиру і РБ. Їх вплив проявляється як суттєва нелінійна інерційність що призводить до зміни часу стабілізації АНПА в точці з 30 с до 120 с.
- результати виконання команди переміщення АНПА (позиціонування) на фіксований крок 5 м по курсу при швидкості течії 2 вузли та зміні опір повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ (потужності маршових рушіїв). З отриманих результатів можна зробити висновок що система згасає без значного перерегулювання завдяки налаштованим коефіцієнтам. Необхідно відмітити результати налаштування дозволили отримати результати які знаходяться в рамках розрахункової похибки при постійному опорі повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ та зміні тяги рушіїв та зміні опорі повздовжньому переміщенню системи АНПА – КБ – РБ та постійній тязі рушіїв.

Слайд 9 мультимедійної презентації