

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний  
(повна назва інституту/факультету)

Приладів і систем орієнтації та навігації  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 629.127

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
Бурау Н.І.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і назва спеціальності)

на тему: Система керування безпілотним підводним апаратом

Виконав : студент 6 курсу, групи ПГ-71мп  
(шифр групи)

Бобрик Владислав Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник зав. кафедри, д.т.н, професор Бурау Н.І. .....  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Розроблення стартап-проекту к.е.н., доц. Бояринова К.О.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент ст. викл. Божко К.М.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Можливість використання безпілотних підводних апаратів(БПА) полегшує вирішення великої кількості завдань пов'язаних з дослідження водного середовища, військового та цивільного використання. Існує безліч безпілотних підводних апаратів з різними системами живлення, призначенням, способом керування, типом рольового комплексу, способом переміщення у воді, потужністю системи електропостачання, а також масою та габаритними характеристиками. Всі ці відмінності потрібно враховувати при проектування безпілотного підводного апарату.

Виконуючи різні види підводних робіт, БПА повинні переміщатися з високою точністю за різними просторовими траєкторіями. Точність цього руху залежить від якості системи керування(СК), яка наявна у цих БПА. Також, треба враховувати актуальність зменшення часу виконання підводних робіт, для зниження вартості використання БПА. Одним з способів досягнення є збільшення швидкості руху БПА за задано траєкторією, тому виникає потреба розробки більш ефективних СК.

Одне з завдань є створення інструментів, які б дозволили проведення попередніх випробувань СК БПА, в режимі моделювання, без експериментальних дослідження, адже це призводить до збільшення затрат часу та матеріальних витрат. Це можливо коли в якості об'єкта керування(ОК) для реалізації СК БПА використовується його математична модель. Цей підхід дозволяє істотно знизити витрати на проектування СК БПА.

БПА є складними багатовимірними нелінійними динамічними об'єктами, що функціонують в умовах наявності перехресних зв'язків між їх ступенями свободи, зовнішніх збурень, а також змінності і невизначеності їх параметрів. Причому зазначені негативні ефекти різко зростають при русі БПА одночасно за кількома ступенями свободи, а також при збільшенні швидкості цього руху, що призводить до необхідності їх врахування при синтезі високоточної СК для високошвидкісного руху БПА [38].

Тому створення якісної системи керування безпілотного підводного апарату є досить актуальним на сьогоднішній день. Цим питання займається велика кількість науковців, з різних країн, створені навіть цілі інститути посвячені цій темі.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є синтез системи керування безпілотного підводного апарату.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

1. Аналіз стану проблеми. Та вибір напрямку дослідження.
2. Аналіз та вибір методів синтезу системи керування безпілотним підводним апаратом.
3. Встановлення особливостей БПА як об'єкта керування.
4. Аналіз структурної схеми керування кутом курсу БПА.
5. Моделювання структурної схеми системи керування кутом курсу безпілотного підводного апарату.
6. Моделювання системи керування кутом курсу при різних режимах роботи.
7. Отримання результатів моделювання при дії та відсутності зовнішнього моменту.

**Об'єктом дослідження** є безпілотний підводним апарат з врахуванням його різновидів та особливостей.

**Предметом дослідження** є синтез системи керування кутом курсу безпілотного підводного апарату, подальше її моделювання, отримання результатів та подальший аналіз роботи системи керування.

**Наукова новизна** роботи полягає в аналізі системи керування кутом курсу БПА, для подальшого покращення параметрів системи керування та використання розробленої системи керування на малогабаритних підводних апаратах.

**Апробація роботи.** Часткові результати роботи висвітлені в наступній статті, що пройшла апробацію та вже опублікована:

Бобрик В.С. Огляд стану сучасних автономних безпілотних підводних апаратів / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, М.Д. Расулов, Бобрик В.С. // Вісник інженерної академії України – 2017. – №4 – С. 12 – 17.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, 21 рисунків, 23 таблиць, списку використаної літератури із 57 позицій. Загальний обсяг роботи 102 сторінок, з яких основна частина викладена на 80 сторінках.

**Ключові слова:** безпілотний підводний апарат, автономні апарати, телекерований апарат, система керування, режим роботи.

## РЕФЕРАТ

**Актуальность темы.** Возможность использования необитаемых подводных аппаратов (НПА) облегчает решение большого количества задач связанных с исследования водной среды, военного и гражданского использования. Существует множество необитаемых подводных аппаратов с различными системами питания, назначением, способом управления, типом ролевого комплекса, способом перемещения в воде, мощностью системы электроснабжения, а также массой и габаритными характеристиками. Все эти различия нужно учитывать при проектировании беспилотного подводного аппарата.

Выполняя различные виды подводных работ, НПА должны перемещаться с высокой точностью по разным пространственными траекториями. Точность этого движения зависит от качества системы управления (СУ), которая имеется в этих НПА. Также, следует учитывать актуальность уменьшения времени выполнения подводных работ, для снижения стоимости использования НПА. Одним из способов достижения является увеличение скорости движения НПА по заданной траектории, поэтому возникает необходимость разработки более эффективных СУ.

Одна из задач является создание инструментов, позволяющих проведение предварительных испытаний СУ НПА в режиме моделирования, без экспериментальных исследования, ведь это приводит к увеличению затрат времени и материальных затрат. Это возможно когда в качестве объекта управления (ОУ) для реализации СУ НПА используется его математическая модель. Этот подход позволяет существенно снизить затраты на проектирование СУ НПА.

НПА являются сложными многомерными нелинейными динамическими объектами, функционирующих в условиях наличия перекрестных связей между их степенями свободы, внешних возмущений, а также сменности и неопределенности их параметров. Причем указанные негативные эффекты резко возрастают при движении НПА одновременно по нескольким степеням свободы, а также при увеличении скорости этого движения, что приводит к необходимости их учета при синтезе высокоточной СУ для высокоскоростного движения НПА [38].

Поэтому создание качественной системы управления необитаемого подводного аппарата является весьма актуальным на сегодняшний день. Этим вопросом занимается большое количество ученых, из разных стран, созданы даже целые институты, посвященные этой теме.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является синтез системы управления необитаемого подводного аппарата.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ состояния проблемы и выбор направления исследования.
2. Анализ и выбор методов синтеза системы управления необитаемым подводным аппаратом.
3. Установление особенностей НПА как объекта управления.
4. Анализ структурной схемы управления углом курса НПА.
5. Моделирование структурной схемы системы управления углом курса необитаемого подводного аппарата.
6. Моделирование системы управления углом курса при различных режимах работы.
7. Получение результатов моделирования при действии и отсутствии внешнего момента.

**Объектом исследования** является беспилотный подводный аппарат с учетом его разновидностей и особенностей.

**Предметом исследования** является синтез системы управления углом курса необитаемого подводного аппарата, дальнейшее ее моделирование, получение результатов и последующий анализ работы системы управления.

**Научная новизна** работы заключается в анализе системы управления углом курса НПА, для дальнейшего улучшения параметров системы управления и использования разработанной системы управления на малогабаритных подводных аппаратах.

**Апробация работы.** Частичные результаты работы освещены в следующей статье, которая прошла апробацию и уже опубликована:

Бобрик В.С. Обзор состояния современных автономных беспилотных подводных аппаратов / Н.И. Бурау, Л.Л. Яцко, М.Д. Расулов, Бобрик В.С. // Вестник инженерной академии Украины - 2017. - №4 - С. 12 – 17.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 21 рисунка, 23 таблиц, списка использованной литературы из 57 позиций. Общий объем работы 102 страниц, из которых основная часть изложена на 80 страницах.

**Ключевые слова:** необитаемый подводный аппарат, автономные аппараты, телеуправляемый аппарат, система управления, режим работы.

## ABSTRACT

**Relevance of the topic.** The ability to use uninhabited underwater vehicles (UUV) facilitates the solution of a large number of tasks related to the study of the aquatic environment, military and civilian use. There are many uninhabited underwater vehicles with different power systems, purpose, control method, type of role-playing complex, method of movement in water, power of the power supply system, as well as weight and overall characteristics. All these differences need to be considered when designing an unmanned underwater vehicle.

Performing various types of underwater work, UUV must move with high accuracy along different spatial trajectories. The accuracy of this movement depends on the quality of the control system (CS), which is available in these UUV. Also, it is necessary to take into account the relevance of reducing the time for performing underwater operations, to reduce the cost of using UUV. One of the ways to achieve this is to increase the speed of movement of the UUV along a given trajectory; therefore, there is a need to develop more efficient CS.

One of the tasks is to create tools that allow conducting preliminary tests of CS UUV in the simulation mode, without experimental research, because this leads to an increase in the cost of time and material costs. This is possible when its mathematical model is used as the control object (CO) for the implementation of the CS UUV. This approach can significantly reduce the cost of designing the management of UUV.

UUV are complex multidimensional nonlinear dynamic objects that function under conditions of the presence of cross-links between their degrees of freedom, external disturbances, as well as shift and uncertainty of their parameters. Moreover, these negative effects increase dramatically with the movement of UUV at the same time in several degrees of freedom, as well as with an increase in the speed of this movement, which leads to the need to take them into account when synthesizing high-precision CS for high-speed movement of UUV [38].



Therefore, the creation of a quality control system for an uninhabited underwater vehicle is highly relevant today. This issue is addressed by a large number of scientists from different countries, even entire institutions dedicated to this topic have been created.

**The purpose and objectives of research.** The aim of the work is to synthesize a control system of an uninhabited underwater vehicle.

To achieve this goal, the following tasks are solved:

1. Analysis of the state of the problem and the choice of the direction of research.
2. Analysis and selection of methods for synthesizing a control system for an unmanned underwater vehicle.
3. The establishment of features of the UUV as a control object.
4. Analysis of the structural scheme of management angle course UUV.
5. Simulation of a block diagram of a course angle control system of an unmanned underwater vehicle.
6. Simulation of the course angle control system for various operating modes.
7. Obtaining simulation results with the action and the absence of an external moment.

**The object of the study** is an unmanned underwater vehicle, taking into account its varieties and features.

**The subject of the research** is the synthesis of the control system for the angle of the course of an unmanned underwater vehicle, its further modeling, obtaining results and the subsequent analysis of the operation of the control system.

**The scientific novelty** of the work lies in the analysis of the control system of the angle of the course of the UUV, to further improve the parameters of the control system and use the developed control system on small-sized underwater vehicles.

**Approbation of work.** Partial results of the work are highlighted in the following article, which has been tested and has already been published:

Bobrik V.S. Review of the state of modern autonomous unmanned underwater vehicles / N.I. Burau, L.L. Yatsko, M.D. Rasulov, Bobrik VS // Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine - 2017. - №4 - P. 12 - 17.

**Structure and scope of work.** The work consists of an introduction, 4 chapters, conclusion, 21 figures, 23 tables, a list of references from 57 positions. The total amount of work is 102 pages, of which the main part is presented on 80 pages.

**Keywords:** uninhabited underwater vehicle, autonomous vehicles, remote-controlled vehicle, control system, operating mode.

## ЗМІСТ

Перелік	умовних	скорочень
.....		<b>О</b>
<b>шибка! Закладка не определена.</b>		
ВСТУП .....		17
РОЗДІЛ 1 .....		19
ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....		19
1.1 Безпілотні підводні апарати .....		19
1.1.1 Класифікація безпілотних підводних апаратів .....		19
1.1.2 Функціональні можливості безпілотних підводних апаратів .....		21
1.2 Телекеровані безпілотні підводні апарати (ТБПА) .....		22
1.2.1 Класифікація та призначення телекерованих безпілотних підводних апаратів.....		22
1.2.2 Типові задачі, які можуть вирішувати телекеровані безпілотні підводні апарати .....		23
1.2.3 Два основні режими використання телекерованих безпілотних підводних апаратів .....		24
1.3 Мініатюрний підводний телекерований апарат "SEA BOTIX" .....		24
1.4 Ознаки та завдання, які виконують автономні безпілотні підводні апарати .....		27
1.5 Завдання системи керування автономних безпілотних підводних апаратів .....		30
1.5.1 Типова структура та функції систем керування автономного безпілотного підводного апарату.....		30
1.5.2 Система керування автономного безпілотного підводного апарату з використанням акустичних систем .....		32
1.5.3 Автономний безпілотний підводник апарат з використання гідроакустичних засобів .....		34
1.6 Огляд виконаних раніше робіт .....		36
РОЗДІЛ 2 .....		39

Аналіз та вибір методів синтезу системи керування підводним безпілотним апаратом та складання структурної схеми керування .....	39
2.1 Особливості безпілотного підводного апарата, як об'єкта керування .....	39
2.2 Підходи до синтезу системи керування підводним безпілотним апаратом. .....	42
2.3 Математична модель безпілотного підводного апарату .....	45
2.4 Структурна схема керування кутом курсу безпілотного підводного апарата. .....	48
Висновки до розділу 2 .....	54
РОЗДІЛ 3 .....	56
Моделювання системи керування кутом курсу для різних режим руху безпілотного підводного апарату.....	56
3.1 Вибір середовища моделювання .....	56
3.2 Моделювання в середовищі Simulink .....	58
3.3 Моделювання режиму роботи при постійному значенні кута курсу безпілотного підводного апарату.....	61
3.4 Моделювання режиму при обході завади за траєкторією .....	66
3.5 Моделювання режиму маневрування за заданою траєкторією.....	70
3.6 Моделювання режиму роботи при рівномірній зміні кута курсу безпілотного підводного апарату.....	72
Висновки до розділу 3 .....	75
РОЗДІЛ 4 .....	77
РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ» .....	77
4.1 Опис ідеї проекту .....	77
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	79
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	88
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	91
Висновки до розділу 4 .....	94

	16
ВИСНОВКИ.....	96
Список використаної літератури .....	98

### **Перелік умовних скорочень**

- АБПА — автономний безпілотний підводний апарат;
- БПА — безпілотний підводний апарат;
- СК – система керування;
- ПА — підводний апарат;
- ПГЗ – пристрій глибоководного занурення;
- САУ – система автоматичного керування;
- СНС – супутникова навігаційна система;
- ТБПА — телекерований безпілотний підводний апарат;
- ОК – об’єкт керування;

## ВСТУП

Можливість використання безпілотних підводних апаратів (БПА) полегшує вирішення великої кількості завдань пов'язаних з дослідження водного середовища, військового та цивільного використання. Одним із важливих факторів при розробці БПА являється забезпечення орієнтації та навігації об'єкту у просторі, для подальшого виконання поставлених завдань.

На даний час, велику перевагу має використання автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА), в порівнянні з іншим видом БПА телекерованих безпілотних підводних апаратів (ТБПА). Це пов'язано з обмеженнями ТБПА, глибиною занурення, дальності дії(через наявність кабель-тросу) та інше. Проте, як АБПА можуть виконувати завдання в автоматичному режимі, без додаткових затрат.

В області створення АБПА взаємодіє велика кількість різних фірм, тільки в США задіяні понад 36, а в Японії - понад 250 фірм. На даний час в Україні не займаються виготовленням БПА, але ця тема стає все актуальнішою для подальшого розвитку.

Враховуючи те, що вже досить багато часу, триває покращення та розширення функціоналу БПА, і вже було зроблено значна кількість досягнень у використанні БПА, таких як, наприклад, знешкодження мін, контроль стану навколишнього середовища, картографування районів катастроф, пошуково-рятувальні операції та інше, виникає потреба розробки та використання БПА в Україні.

Одним з найскладніших етапів розробки БПА, є створення якісної системи керування, як вже зазначалося, БПА є складними багатовимірними нелінійними динамічними об'єктами, що функціонують в умовах наявності перехресних зв'язків між їх ступенями свободи, зовнішніх збурень, а також змінності і невизначеності їх параметрів. Тому виникає складність врахування усіх коефіцієнтів та моментів, які впливають на БПА. Створення системи керування за повною математичною моделлю потребує великої кількості часу та потребує подальшого розгляду.

Об'єктом дослідження буде безпілотний підводний апарат, його особливості, як об'єкта керування, функціональні можливості, класифікація, режими роботи та завдання які вони виконують.

Мета і завдання магістерської дисертації, це синтез існуючої системи керування, її моделювання та покращення характеристик системи керування безпілотним підводним апаратом, з врахуванням особливостей використання в різних надзвичайних умовах, а також можливість використання за різних режимів роботи.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Безпілотні підводні апарати

За останні два-три десятиліття в різних країнах, які займають провідне становище в області морських технологій було створено значну кількість безпілотних підводних апаратів (БПА) для вирішення широкого кола наукових і прикладних задач по дослідженню і освоєнню океану. За короткий період БПА продемонстрували свою ефективність при виконанні досить складних глибоководних оглядово-пошукових і дослідницьких робіт і відкрили ряд нових важливих застосувань для морської геологічної розвідки, вивчення підводної обстановки і екологічного моніторингу водного середовища.

Для успішного використання підводного апарату потрібен не стільки сам апарат, скільки хороша система керування рухом. В якості вихідних даних для проектування алгоритмів використані відомі рівняння руху підводного апарату, характеристики джерел інформації і виконавчих органів. Алгоритми керування будуються на базі активної адаптивної моделі, а також на основі похибок параметрів моделі і підводного апарату обчислюється узагальнена сила для забезпечення використання та стабілізації.

##### 1.1.1 Класифікація безпілотних підводних апаратів

Існує безліч безпілотних підводних апаратів з різними системами живлення, призначенням, способом керування, типом рольового комплексу, способом переміщення у воді, потужністю системи електропостачання, а також масою та габаритними характеристиками.



За призначенням БПА поділяють на такі типи [4]:

- пошукові;
- обслідувальні;
- робочі;
- дослідні;
- багатоцільові (подвійного застосування).

За способом живлення БПА підрозділяють на наступні типи [4]:

- телекеровані БПА, які отримують електроживлення з носія;
- автономні БПА, не пов'язані з носієм і мають власні джерела живлення;
- напів-автономні БПА.

Спосіб управління БПА може бути: дистанційно керованим оператором (ТБПА), або ж автоматично керованим за програмою (АБПА).

За масою безпілотні підводні апарати поділяються на такі типи (в залежності від способу керування) [4]:

Телекеровані безпілотні підводні апарати [4]:

- а) мікро, з масою менше 5 кг;
- б) міні, з масою від 5 до 30 кг;
- в) легкі, з масою від 30 до 100 кг;
- г) середні, з масою від 100 до 2000 кг;
- д) важкі, з масою більше 2000 кг.

Автономні безпілотні підводні апарати [4]:

- а) легкі з масою менше 50 кг;
- б) середні з масою від 50 до 500 кг;
- в) важкі з масою від 500 до 5000 кг.

За потужністю системи електропостачання БПА поділяють на такі типи [4]:

- малі (вихідна потужність до 10 кВт);
- легкі (вихідна потужність до 30 кВт);
- середні (вихідна потужність до 75 кВт);
- важкі (вихідна потужність понад 75 кВт).

За способом переміщення у воді БПА поділяють на такі типи [4]:

- буксирні, що рухаються за судном-носієм по його траєкторії;
- самохідні, що мають рушійні установки;
- донні, що переміщаються по ґрунту;
- дрейфують, що переміщаються в товщі води під впливом течії.

За типом рульового комплексу БПА поділяють [4]:

- на активні (гвинтові);
- пасивні (рулі).

### **1.1.2 Функціональні можливості безпілотних підводних апаратів**

В залежності від класу БПА та його призначення, вони можуть виконувати такі задачі [7]:

- Гідрографічна розвідка;
- Операції зі знешкодження мін;
- Операції по забезпеченню безпеки в гаванях;
- Контроль стану навколишнього середовища;
- Картографування районів катастроф;
- Пошуково-рятувальні операції;
- Підтримка водолазних спусків і забезпечення безпеки виконання водолазних робіт відповідно до міжнародних норм, проведення пошуково-обстежуючи і оглядових завдань на глибинах недоступних водолазам;
- Охорона об'єктів і судів на акваторії, огляд без ризику для життя водолазів гідротехнічних споруд, водоводів, внутрішніх приміщень затонулих об'єктів.

В даний час ТБПА використовується все рідше, такі апарати з'єднані з кораблем-носієм спеціальним кабелем, по якому здійснюється енергоживлення апарату, передача керуючих сигналів і отримання різної інформації з датчиків ТБПА. Але у таких апаратів є серйозні недоліки. В першу чергу - сам кабель, він обмежує глибину занурення і дальність дії. В основному вони застосовуються для аварійних та рятувальних робіт, коли потрібне оперативне управління, виходячи з підводної обстановки. Тому все частіше при вирішенні різних завдань застосовують

автономні безпілотні підводні апарати (АБПА), здатні в автоматичному режимі виконувати поставлені перед ними завдання. Звісно, що функція дистанційного керування завжди присутня в апаратах цього класу [3,4].

Незважаючи на те, що АБПА, автономні в сенсі енергозабезпечення та в сенсі управління, на сьогоднішній день також широко застосовуються безпілотні підводні апарати, що володіють тільки автономністю в плані управління, а живлення здійснюється по кабелю з корабля-носія, і навпаки, подача живлення на пристрій є автономною, а управління здійснюється оператором по кабелю. Існуючі системи БПА здатні працювати і забезпечувати виконання окремих під-задач в автоматичному режимі, тобто оператор дає команди «Рухатися до того предмету», «Підняти заданий об'єкт», а системи управління БПА виконують поставлені завдання в автоматичному режимі з урахуванням зовнішніх обставин (течії, наявність перешкод і т.д.) [3].

## **1.2 Телекеровані безпілотні підводні апарати (ТБПА)**

Телекерований безпілотний підводний апарат (ТБПА) - апарат, обладнаний спеціальним обладнанням, занурюваний в воду і керований з поверхні пілотом або групою операторів (пілот, навігатор і ін.). Підводне обстеження за допомогою ТБПА дозволяє отримати об'єктивну візуальну інформацію про стан підводних об'єктів в режимі реального часу з можливістю запису для подальшого детального аналізу [5].

### **1.2.1 Класифікація та призначення телекерованих безпілотних підводних апаратів**

Залежно від розміру і вирішуваних завдань ТБПА можна розділити на наступні класи [10,18]:

Малогабаритні ТБПА:

В основному виконують завдання по обстеженню підводних об'єктів. Завдяки своїм малим розмірам можуть перевозитися в легкових автомобілях, використовуватися в умовах обмеженого простору, наприклад, всередині трубопроводів. Для експлуатації апарату достатньо однієї людини.

ТБПА легкого класу [10,18]:

На відміну від малогабаритних, ТБПА легкого класу, є більш потужними і габаритними. Призначені для повномасштабних підводних досліджень, так як можуть нести на собі більше додаткового обладнання для виконання більш широкого спектру завдань і піднімати предмети невеликої ваги.

Робочі ТБПА легкого класу [10,18]:

Відносно невеликі потужні робочі апарати з маніпуляторами та інструментальними комплексами, які, крім завдань пошуку і обстеження підводних об'єктів, здатні виконувати і підводно-технічні роботи на підводних об'єктах (платформи, трубопроводи). Типовими завданнями для цього класу є підтримка буріння і легкого будівництва, дослідження труб і інша спільна робота.

Робочі ТБПА важкого класу [10,18]:

Відрізняються від робочих ТБПА легкого класу, тим, що можуть виконувати складні підводні роботи на сильних течіях. Використовуються для глибоководних операцій.

### **1.2.2 Типові задачі, які можуть вирішувати телекеровані безпілотні підводні апарати**

ТБПА можуть вирішувати такі типові завдання [10,11]:

- Пошук і виявлення об'єктів під водою, як візуально, так і за допомогою спеціалізованого пошукового обладнання;
- Огляд і документування стану підводних споруд та обладнання, знайдених затонулих суден, уламків літальних апаратів і т.д.;
- Підняття на поверхню знайдених об'єктів, в тому числі бортових самописців літальних апаратів;

- Маркування місця знаходження знайдених об'єктів за допомогою гідроакустичних маяків;
- Проведення підводних інспекцій за допомогою спеціалізованого обладнання (вимір товщини металевих конструкцій, катодного потенціалу і т.д.);
- Відбір проб води та ґрунту, в тому числі в місцях техногенних і екологічних катастроф [10,18].

### **1.2.3 Два основні режими використання телекерованих безпілотних підводних апаратів**

«Плаваючий» режим. Застосовується при роботах на невеликих глибинах: до 300 м для підводних апаратів пошуково-обслідувальний групи і до 1000 м для підводних апаратів робочої групи. Спуск апарату за борт судна здійснюється за допомогою штатного спуско-під'ємного пристрою (СПП) судна. Управління ТБПА здійснюється з пульта управління, розміщеного в спеціальному приміщенні судна, або на посту управління контейнерного типу, що поставляється компанією-виробником [18].

Режим роботи з пристроєм глибоководного занурення (ПГЗ). Застосовується при роботі на великих глибинах. ПГЗ є спеціальний контейнер в якому ТБПА опускається на робочу глибину. Спуск апарату за борт судна здійснюється за допомогою спеціального спуско-під'ємного пристрою (СПП), що входить в комплект ТПА. Управління роботою ТБПА і ПГЗ здійснюється з кабіни управління чи спеціально обладнаного поста керування судна-носія [18].

## **1.3 Мініатюрний підводний телекерований апарат "SEA BOTIX"**

Мініатюрний телекерований підводний апарат «SeaBotix» представляє собою нове покоління підводних апаратів, поєднуючи в собі невеликі габарити і вагу з широкими функціональними можливостями [12].

Основне призначення ТПА «SeaBotix» - пошук підводних об'єктів и виконання оглядових и дослідницьких робіт під водою в прибережних морських або внутрішніх водах. Крім того, апарат може використовуватися для установки гідроакустичних маркерів і підйому предметів, захоплених маніпулятором [12].

Компактне розміщення елементів надводної частини обладнання дозволяє використовувати апарат з невеликих катерів і гумових човнів, а взимку здійснювати спуски прямо з льоду. Малі розміри і маневреність підводного апарату дозволяють йому проникати і обстежити області, недоступні водолазам, наприклад внутрішні приміщення затонулих об'єктів, галереї водозаборів, трубопроводи. Невелика маса підводного апарату, а також використання кевларового кабель-троса для живлення і управління дозволяють здійснювати спуск і підйом підводного апарату безпосередньо за кабель без застосування спеціальних спускових пристроїв [12].

Завдяки низькому енергоспоживанню система ТПА може живитися від звичайної однофазної мережі змінного струму або навіть від автомобільної акумуляторної батареї. Напруга живлення самого підводного апарату, здійснюване по кабель-тросу є безпечним для людини і не вимагає від персоналу додаткових знань і навичок з обслуговування електротехнічних виробів [12].

Управління апаратом здійснюється з компактного ручного пульта управління. Пульт виконаний в високоміцному пластиковому корпусі. До складу пульта входить джойстик керування рухом підводного апарата, кнопки регулювання кута нахилу платформи з відеокамерами, регулятор потужності світильників, кнопки управління режимами робіт додаткових пристроїв, клавіатура введення текстової інформації на відео зображення та інші необхідні елементи управління [12,13].

Підводний апарат оснащений двома горизонтальними, одним лаговим і одним вертикальним рушіями. Гвинти рушіїв знаходяться за захисною сіткою, що забезпечує їх захист від попадання водоростей і інших сторонніх предметів. Для збільшення маневреності та керованості підводного апарату на сильних течіях і зниження регламентних робіт з технічного обслуговування можлива заміна стандартних рушіїв постійного струму на більш потужні безконтактні рушії постійного струму. У передній півсфері підводного апарату розташовується

платформа із змінним кутом нахилу, на яку встановлюються цифрова кольорова відеокамера з підвищеною роздільною здатністю і чорно-біла відеокамера з підвищеною світлочутливістю. Кольорова камера використовується для обстеження і передачі високоякісного зображення підводних об'єктів, чорно-біла камера зазвичай застосовується для навігації апарату і обстеження об'єктів в каламутній і сильно забрудненій воді [12].

Для освітлення водного простору ТБПА оснащений світильником, з регульованою потужністю, розташованим також на похилій платформі. Додатково можливе розміщення двох світильників на рамі підводного апарату.

Функціональні та технічні можливості дозволяють розмістити на підводному апараті великий спектр додаткового обладнання, що суттєво збільшує можливості апарату по обстеженню підводних об'єктів [12].

У стандартній комплектації система ТБПА «SeaBotix» включає [12]:

- корпус підводного апарату з високоміцного пластика;
- чотири рушія;
- світильник 50 Вт;
- компас, глибиномір, датчик температури;
- кольорова відеокамера 570 ТВЛ, 0,3 ЛКС на платформі із змінним кутом нахилу 180°;
- кабель-трос з нейтральною плавучістю довжиною 75, 150 або 250 м;
- кейс для підводного апарату і кабель-троса;
- блок живлення 110-220 В, 650 Вт і пульт управління у транспортувальному кейсі;

В якості додаткового обладнання пропонується [12]:

- дообладнання підводного апарату для роботи на глибинах до 300 метрів;
- дообладнання підводного апарату для роботи з кабель тросом довжиною 750 метрів;
- захисна металева рама підводного апарату;
- кольорова відеокамера з регульованим зумом 10х оптичний, 4х цифровий, 480 ТВЛ, 2 лк;

- чорно-біла цифрова відеокамера 430 ТВЛ, 0.03 лк;
- інтегрована консоль управління з вбудованим блоком живлення, пультом управління, рідкокристалічним монітором 12" і портативним цифровим відеомагнітофоном формату miniDV;
- в'юшки для кабель-троса з струму переходом;
- маніпулятор з одним ступенем вільності
- гідролокатор кругового огляду Micron із змінною робочою частотою 550 – 950 кГц, ноутбуком і спеціальним програмним забезпеченням;
- два світильника по 20 Вт;
- система гідроакустичного позиціонування;
- магнітометр, датчик електрохімічного потенціалу, датчик вимірювання радіації, датчики вимірювання температури і так далі;

Технічні характеристик ТБПА можна дізнатися використовуючи джерело [12].

#### **1.4 Ознаки та завдання, які виконують автономні безпілотні підводні апарати**

Автономні безпілотні підводні апарати класифікуються за двома ознаками: за масою і за формою [4].

За масою АБПА розділяються на мікро-, міні-, малі, середні та великі. До мікро-АБПА відносяться апарати масою менше 20 кг. Дана категорія становить 20-25% від загального числа відомих проектів АБПА [4]. Типові технічні характеристики цієї категорії апаратів: дальність плавання не більше 1-2 морських миль, гранична робоча глибина менше 150 м; швидкість ходу - 1,5-2 вузла [4,5].

До категорії міні-АБПА належать апарати масою в межах 20-100 кг (15-20% від загального числа проектів АБПА). Діапазон дальності плавання міні-АБПА досить широкий - від 0,5 до 4000 морських миль. Малі АБПА - це АБПА масою 100-500 кг. Середні АБПА мають масу від 500 до 2000 кг [4,5].

За формою корпусу АБПА (по вигляду конструкції) сформувалися такі типи [4]:



- з класичними гідродинамічними формами (циліндричної, торпедної, краплеподібної, плоскою і комбінованої);

- планерної форми з системою руху, заснованої на зміні власної (залишкової) плавучості апарату;

- з плоскою верхньою частиною корпусу (сонячні АБПА - апарати з фотоелектронними перетворювачами для підзарядки акумуляторних батарей);

- з біонічної формами (плаваючого і повзучого типу) або створені з використанням біонічних принципів (наприклад, апарати з плавниковими рушіями).

Автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) з різним ступенем автоматизації, призначені для пошуку і обстеження підводних об'єктів, проведення гідрологічних і океанологічних досліджень, використання у військових цілях [5].

Автономні безпілотні апарати вирішують велике коло завдань, які з часом поповнюються. Ось основні з них [7]:

- Гідрографічна розвідка;
- Операції зі знешкодження мін;
- Операції по забезпеченню безпеки в гаванях;
- Контроль стану навколишнього середовища;
- Картографування районів катастроф;
- Пошуково-рятувальні операції;

Основна частина робіт проводиться на глибинах до 1000 м. Тільки близько 30% АБПА мають робочу глибину занурення понад 1000 м, решта - робочу глибину менше 1000 м; глибоководних АБПА (з робочою глибиною 6000 м і більше) – одиниці [6].

Основними перевагами АБПА перед апаратами інших типів є [4]:

- відсутність кабель-тросового зв'язку з судном-носієм і відповідно визначених нею недоліків;

- здатність функціонувати в місцях, недоступних для інших типів ПА;

- скритність функціонування;

- висока мобільність;

- простота експлуатації та висока продуктивність.

Залежно від ємності джерел енергії апарат може працювати до декількох десятків годин. Модульна конструкція дозволяє оперативно встановлювати і змінювати комплекс бортової апаратури [4].

АБПА 21 століття представляються закордонним фахівцям як апарати, які володіють [4]:

- великою автономністю (до 200 год);
- розвиненою системою маніпуляторів;
- високоорганізованою «інтелектуальною» системою керування (СК), що реалізує такі функції, як розпізнавання образів, прийняття рішень в умовах часткової і повної невизначеності, адаптація до зовнішніх впливів.

В області створення АБПА взаємодіє велика кількість різних фірм, тільки в США задіяні понад 36, об'єднаних під егідою МО через ВМС і управління DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), а в Японії - понад 250 фірм. До числа досягнень з відпрацювання технологій створення перспективних АБПА можна віднести ПА UUV, XP-21 Sea Squirt (США), DOLPHIN, DOGGIE (Великобританія), RTV-КАМ (Японія), ARUS (Європейський консорціум) [4].

Зазвичай, АБПА працює по закладеній програмі - рухається, виконує завдання і повертається до судна або берегової бази. Апарати такого типу приймають команди і передають інформацію за допомогою гідроакустичної системи зв'язку. Навігаційні системи теж гідроакустична, доповнена інтегральною бортовою навігаційною системою, дозволяє відстежувати траєкторію руху апарата в реальному часі [1].

З урахуванням того, що на сьогоднішній день підводні апарати можуть істотно підвищувати ефективність військового і цивільного флоту, виконуючи різні цільові завдання з високим ступенем надійності і точності відпрацювання, існує актуальне завдання розробки і розвитку систем керування АБПА, які б відповідали зростаючим вимогам до якості функціонування АБПА.

## **1.5 Завдання системи керування автономних безпілотних підводних апаратів**

Для виконання оглядово-дослідницьких та розвідувальних робіт на великих глибинах в умовах складного рельєфу дна, підлідних робіт і т.п., необхідна організація на борту АБПА розвиненої системи керування. Спочатку в АБПА використовувалися прості системи керування (аналогові модулі управління, мікро-програмні автомати). Апарати такого класу могли виконувати нескладні оглядово-пошукові роботи, а завдання для АБПА представляли собою лінійні програми. Такі структури використовувалися в деяких зарубіжних апаратах і перших радянських апаратах ( "Скат-Гео", "J1-2") [16]. При цьому виявилися обмеження, обумовлені жорсткою структурою управління. Ядро системи управління - програмний блок – був реалізований у вигляді цифрового автомата на основі мікросхем низького та середнього рівня інтеграції. Хоча це і дозволило зробити ядро системи відносно простим і зручним в обслуговуванні, але зберегло основні обмеження, пов'язаних з відсутністю автономної корекції руху [16].

За час розвитку елементної бази в АБПА стали поміщати досить потужні обчислювальні системи. Завдяки яким, стало можливим виконання складних дослідницьких робіт в комплексних дослідках по моніторингу океану. До систем керування АБПА при цьому пред'являють ряд серйозних вимог до надійності і автономності, властивості апарату працювати в складних умовах середовища [15].

### **1.5.1 Типова структура та функції систем керування автономного безпілотного підводного апарату**

Розглянемо характерні особливості системи керування з урахуванням до неї основних вимог. Як уже зазначалося, в розвитку АБПА існує певна тенденція до використання в тому чи іншому вигляді каналу телекерування. Для цього є ряд об'єктивних умов. По-перше використання каналу телекерування (супервізорного

керування) суттєво розширює можливості АБПА при виконанні складних оглядово-пошукових і пошуково-обстежувальних завдань. По-друге, у міру розвитку обчислювальних середовищ, помічається зближення телекерованих апаратів і АБПА [15].

Незважаючи на всі відмінності в організації програмно-апаратної архітектури існуючих апаратів, будь-яка система керування виконує в складі АБПА наступні основні функції [16]:

- організовує виконання програми завдання і здійснює управління рухом;
- здійснює обробку запитів від систем виявлення і навігації і відповідну корекцію завдання;
- контролює стан бортових пристроїв і корпусних системи АБПА, а також умови зовнішнього середовища для забезпечення безпеки при роботі під водою;
- організовує роботу бортової апаратури відповідно до завдання;
- здійснює збір і накопичення інформації;
- здійснює перед стартом тестування бортових пристроїв і перевірку завантаженої місії;

Загальну структуру системи керування можна представити наступним чином. Система має внутрішній контур зворотного зв'язку по керуванню та зовнішній з планування. Відповідно є система керування нижнього та верхнього рівня. Остання включає у свій склад планувальник, який задає траєкторію АБПА, використовуючи послідовність команд. Далі ці команди інтерпретуються нижнім рівнем системи управління [рис. 2.1 - 16].

Планувальник разом з програмою завдання задає ціль для системи керування нижнім рівнем. Планувальник може мати різну структуру. Регулятори, які входять в склад нижнього рівня системи керування, потрібні для досягнення цільових значень, заданих планувальником, і також можуть мати різну структуру. В даний час для керування АБПА використовують, як класичні ПІД-регулятори, так і регулятори з змінною структурою, на основі нечіткої логіки, нейронних мереж та інше. Контрольно-аварійна система також входить в склад нижнього рівня системи керування. В задачі контрольно-аварійної системи входить оцінка стану апарату і

реалізація дії по відновленню стану підсистем АБПА у випадку виходу їх зі строю. Як правило, контрольно-аварійна система має еталонну модель керованих процесів [16].

Оскільки основна задача АБПА – збір інформації, то необхідною частиною системи керування являється накопичувач даних. Як правило, у ролі накопичувача виступає жорсткий диск керуючого комп'ютера. Інформація за допомогою архіватору зберігається у вигляді, придатним для подальшого аналізу. Для реалізації зовнішнього контуру зворотного зв'язку в якості приладу, який отримує інформацію про зовнішнє середовище, використовують в основному різні ехолокаційні прилади. Практичне розповсюдження отримали багатопроменеві ехолоти з фіксованою діаграмою направленості або ж скануючі локатори. Проводять експерименти з використання інших способів отримання інформації, наприклад відеокамер. В даний час за допомогою них, вдається отримати нескладні відео зображення для керування АБПА [15].

### **1.5.2 Система керування автономного безпілотного підводного апарату з використанням акустичних систем**

Автономний безпілотний підводний апарат (АБПА) являє собою автоматичний самохідний носій дослідної апаратури, здатний занурюватися в заданий район океану на глибину до 6 км, рухатися по програмній траєкторії, виконувати необхідні роботи і по закінченню програми повертатися на судно або берегову базу [1].

АБПА працює під водою автономно, без сполучного кабелю. Передача команд на борт апарату і телеметричної інформації на базове судно здійснюється за допомогою гідроакустичної системи зв'язку. Гідроакустична навігаційна система спільно з інтегральною бортовою навігаційної системою дозволяють безперервно визначати місце розташування апарата, а оператору на судні - відстежувати траєкторію його руху в реальному масштабі часу [1,2].

В якості дослідницької апаратури на апараті встановлюються вимірювачі параметрів середовища, фото-відеоапаратура, оглядові гідролокатори, геофізична апаратура (магнітометр, акустичний профілограф, гравіметр).

АБПА володіє значно більшою маневреністю, ніж буксирний засіб, високим ступенем точності стабілізації параметрів руху (в тому числі, в умовах складного рельєфу дна), а також простотою експлуатації, має продуктивність, не залежить від глибини. Крім того, в зв'язку з розвитком високих технологій в області робототехніки та електроніки, постійним зростанням вартості водолазного праці, а також необхідністю виконання робіт на глибинах в кілька тисяч метрів, застосування АНПА стало реальною альтернативою водолазних робіт [4].

АБПА повинен виконувати цілий ряд функцій у процесі обстеження:

- візуальний огляд зовнішнього вигляду підводно-технічного об'єкта;
- вимір різних технічних характеристик об'єкта;
- вимір різних гідрофізичних параметрів середовища;
- обстеження акваторії.

Однією з головних проблем при створенні АБПА є навігаційне забезпечення в океані. Значний прогрес у підвищенні точності визначення місцеположення АБПА досягнутий завдяки використанню супутникової навігаційної системи (СНС) із застосуванням системи занурюються буїв, забезпечених гідроакустичними приладами [4].

Узагальнене уявлення про спосіб визначення координат АБПА за допомогою акустичних систем дає [рис. 3 – 1]. Тут відображене базове судно і АБПА на відстані  $L$  від судна. На рисунку прийняті позначення:  $\varphi_k, \lambda_k$  та  $\varphi_a, \lambda_a$  – відповідно широта та довгота базового судна та АБПА;  $\psi$  – курс базового судна;  $\theta, \gamma$  – вимірювані гідроакустичною системою базового судна кут занурення і пеленгу АБПА;  $A$  – азимутальний кут АБПА;  $L_{NS}, L_{WE}$  – проекція дальності  $L$  на північне та східне направлення.

Координати судна відомі з високою точністю з показань СНС, що працює в диференціальному режимі, який підтримується локальною контрольною корегувальною станцією (ЛККС). Визначення розташування АБПА можливо двома

способами: через показання БНС на борту апарату і шляхом об'єднання даних від корабельної НАП СНС і даних акустичної навігаційної системи [1].

Таким чином, можливе отримання вимірювань шляхом формування різниць інерційних і супутниково-акустичних даних і наступна їх комплексна обробка.

Структурна схема і загальний алгоритм комплексу орієнтації і навігації (КОН) АБПА залежать від багатьох чинників [7]:

- типу об'єкта, для якого він призначений;
- складу завдань і ступеня їх автоматизації;
- типу бортового обчислювального комплексу і характеристик БЦВМ;
- апаратного складу інформаційного комплексу та ліній зв'язку КОН.

При розробці алгоритмів КОН АБПА слід враховувати потрібну точність визначення координат об'єкту обстеження і велике число зовнішніх факторів, таких як гідрометеорологічні і гідрофізичні дані акваторії об'єкта, глибину і діапазон зміни глибин, характер ґрунту, на якій розташований об'єкт обстеження та інше [1].

### **1.5.3 Автономний безпілотний підводник апарат з використання гідроакустичних засобів**

В даний час є дані про цілу низку АБПА з використанням гідроакустичних засобів, з яких автономний підводний транспортний засіб HUGIN 3000, розроблений норвезькою компанією Kongsberg Simrad, є, ймовірно, одним з найбільш перспективних [1].

Довжина апарата становить 5,3 м, максимальний діаметр корпусу 0,735 м, маса 1000 кг, швидкість 2 м/с, дальність ходу 250 км, глибина занурення 600 м. До теперішнього часу апарати цього класу виконали понад 100 операцій. Апарат і судно використовують три канали акустичного зв'язку. Командний канал з частотною модуляцією забезпечує стійкий зв'язок зі швидкістю 55 біт/с (використовується для прийому даних про стан систем апарату і передачі команд) [16].

Швидкісний односпрямований канал з багатоканальної частотної модуляцією (швидкість - 2000 біт/с) використовується для передачі на судно даних обстеження в реальному часі. Третій канал, об'єднаний з акустичною навігаційною системою, є аварійним і забезпечує передачу команд на апарат. Його прийомний блок фізично відокремлений від решти електроніки, він розміщений в окремому контейнері і має власне джерело живлення [16].

Система управління БПА має ієрархічну структуру. Програма місії вводиться перед спуском апарату і може коригуватися по командному каналу зв'язку. Є підсистема виявлення помилок, яка інформує оператора, оцінює небезпеку ситуації. Вона може виконати відключення несправних пристроїв, а в критичних випадках забезпечити аварійне спливання апарату [16].

Бортова навігаційна система БПА «Hugin» містить інерціальну навігаційну систему (ІНС), тривимірний магнітометр, кварцовий датчик тиску і доплеровській лаг. Гідроакустична навігаційна система з ультракороткою базою SSBL (Super Short Base Line) інтегрована з доплеровським лагом, інерціальною навігаційною системою і апаратурою супутникової навігаційної системи GPS для забезпечення роботи в надводному положенні. На БПА «Hugin» використовується батарея паливних елементів на основі окису алюмінію, яка забезпечує автономне підводне плавання протягом 48 годин. Занурення і спливання апарату проводиться за рахунок рушія [14,16].

Для підйомних операцій передбачений похилий лоток, пов'язаний з контейнером, в котрому розміщується апарат. При спливанні апаратом скидається носовий конус з тросом, за допомогою якого і проводиться підйом. У 1998 р для перевірки можливості виявлення морських мін на глибинах 80-200 м БПА «Hugin» був обладнаний багатопроменевих ехолотом EM-3000. Він працює на частоті 200 кГц (при частоті посилок 5-6 Гц), генеруючи 127 променів з шириною променя 1,5 x 1,5 ° (уздовж і поперек траси). На висоті 50 м від ґрунту ширина смуги огляду становить 250 м (тобто в 5 разів більше висоти щодо дна моря) [1,14].

Дані від багатопроменевого ехолота і навігаційних датчиків надходять на судно зі швидкісного каналу зв'язку, а також записуються на апараті на знімний



жорсткий диск для подальшої обробки. На випробуваннях, проведених в грудні 2001 р, перевірялися функціональні можливості «Hugin», як протимінного БПА. На першому пробігу при управлінні з борта тральщика – шукача мін «Картоу» апарат безперервно здійснював передачу на корабель гідроакустичного зображення морського дна. На другому пробігу він функціонував автономно відповідно до попередньо завантаженої програми, приховано здійснюючи розвідку району постановки навчальної мінної загрози, що складається з макетів мін [1,14].

На обох пробігах БПА рухався на глибині 125 м на відстані 50 м від ґрунту. ВМС Норвегії та фірма «Kongsberg Simrad» планують обладнати БПА «Hugin» вдосконаленим набором засобів виявлення, в тому числі ГБО (гідролокатор бокового огляду) з високою роздільною здатністю. Повномасштабний демонстраційний зразок протимінного БПА був поставлений ВМС Норвегії для експлуатаційних випробувань в 2005 р, які планують використовувати цей БПА для обстеження морських фарватерів, мінної розвідки і картографування, а також швидкої оцінки мінної обстановки в районі [1].

У складі комплексу орієнтації і навігації можна виокремити наступні системи: DVL – допліревський вимірювач швидкості; акустична система HiPAR, яка використовує і дані DGPS; глибиномір; компас; гіроскопи та акселерометри [1]. Схема навігаційної системи АБПА “HUGIN 3000” представлена на [рис. 6 - 1].

## **1.6 Огляд виконаних раніше робіт**

Одним з важливих питань при розробці безпілотних підводних апаратів, є його математичний опис. В даній сфері працюють спеціальні відділи суднобудування, також створено цілі інститути присвячених роботі в цій галузі.

В ході огляду робіт, було виявлено два типи підводних роботів: перші, які обслуговують підводні споруди (мости, бурові установки, газопроводи, проводять огляд суден), дані тип БПА повинні володіти високою точністю при переміщенні по різних траєкторіях, якість переміщення багато в чому залежить від системи

керування . Так само зі збільшенням швидкості зменшується час, відповідно і час використання БПА [17].

Прикладом такої роботи є ТНПА «Супер Гном Про». До другого типу відносяться АБПА, які використовуються для дослідження, зйомки океанічного, морського чи річкового дна, дослідження флори і фауни [18].

Проектуючи систему керування безпілотним підводним апаратом, треба в реальних умовах, або ж наближених до них, провести багато експериментів, це в свою чергу є фінансово витратним, тому виникає необхідність створення інструментів, які б дозволили провести експерименти в напівнатуральному режимі, це означає, що об'єктом керування для системи керування БПА є його мат-модель. Цей підхід дає змогу зниження витрат та збільшення швидкості отримання результатів.

Багато робіт присвячено математичному опису БПА [17, 19, 20], а також зарубіжних [21, 22, 23]. Варто зауважити, що математичні описи можуть відрізнятися через різні розташування рухомої і нерухомої системи координат, прийняття будь-яких припущень (спрощень) в ході математичного опису. Так само впливає вибір системи координат. Зазвичай автори дотримуються кутів Ейлера, звані «літаковими кутами» [17, 19, 20, 24] в зарубіжній літературі вибір системи координат може відрізнятися. Наприклад, в роботах [23] і [24] в рівняннях опису динаміки безпілотного підводного апарату знаки при деяких членах рівняння відрізняються, деякі члени відсутні.

При синтезі системи керування безпілотним підводним апаратом, автори описують такі основні проблеми:

- гідродинамічні сили і моменти мають нелінійні залежності [20, 24, 25, 26]. Якщо БПА мають складну форму, наприклад, з технологічним обладнанням, то напрямок рух залежить не тільки від швидкості, але і від напрямку руху [19];

- приєднані маси, які впливають на інерційні параметри БПА, дане явище має значення через в'язкості навколишнього середовища: при русі частина рідини переміщається разом з БПА. Дане явище носить теж нелінійний характер [19];

- наявність перехресних зв'язків між ступенями свободи БПА. Дані перехресні зв'язку виникають через коріолісові і доцентрові прискорення при рухах БПА за двома або більше ступенів свободи [19, 24, 25];

- зовнішні впливи з боку навколишнього середовища (підводні течії). Даний вплив, у багатьох випадках, неможливо виміряти [24, 25].

В ході огляду літератури, було виявлено, що більшість труднощів з синтезуванням високоякісної системи керування полягає в неможливості визначення параметрів самої АБПА [17, 21, 22, 27, 28], так і неможливості вимірювання зовнішніх впливів.

На основі робіт по синтезу системи керування БПА, можна виділити кілька основних груп:

- група СК, яка синтезована на спрощених математичних моделях БПА, або на будь-яких припущеннях (наприклад, сталість параметрів БПА). Дана СК показує прийнятні результати на окремих режимах роботи, при яких параметри БПА мають малий вплив, так само мало впливають перехресні зв'язку і т.д. Даний прийом описаний в роботі [21];

- група СК, заснована на адаптивних системах, які дозволяють обчислювати і підлаштовувати параметри СК до постійно змінюваних параметрів БПА в ході функціонування. Адаптивні системи мають високу якість керування, але недоліками є висока складність при збільшенні числа ідентифікованих параметрів в режимі функціонування БПА [17, 24];

- група СК, до якої відносяться робастні системи керування, що забезпечують незалежність процесу керування від параметрів і властивостей об'єкта керування [29, 30].

Отже, надалі треба провести аналіз методів синтезу СК БПА, а також дослідити особливості безпілотного підводного апарату, як об'єкта керування.

## РОЗДІЛ 2

### **Аналіз та вибір методів синтезу системи керування підводним безпілотним апаратом та складання структурної схеми керування**

Загальні проблеми, перспективи розвитку підводних апаратів та підводної робототехніки в загальному дається в роботах [14, 31, 32, 33, 34]. Аналізуючи зазначені джерела, виконуючи різні види підводних робіт, БПА повинні переміщатися з високою точністю за різними просторовими траєкторіями. Точність цього руху залежить від якості СК, яка наявна у цих БПА. Також, треба враховувати актуальність зменшення часу виконання підводних робіт, для зниження вартості використання БПА. Одним з способів досягнення є збільшення швидкості руху БПА за задано траєкторією, тому виникає потреба розробки більш ефективних СК.

Як вже зазначалось, одне з завдань є створення інструментів, які б дозволили проведення попередніх випробувань СК БПА, в режимі моделювання, без експериментальних дослідження, адже це призводить до збільшення затрат часу та матеріальних витрат. Це можливо коли в якості об'єкта керування(ОК) для реалізації СК БПА використовується його математична модель. Цей підхід дозволяє істотно знизити витрати на проектування СК БПА.

#### **2.1 Особливості безпілотного підводного апарата, як об'єкта керування**

Аналіз математичної моделі будь-якого динамічного об'єкта, особливостей використання, є важливим етапом розробки системи керування, чим більше особливостей об'єкта буде враховано, тим більше буде якість роботи СК.

Динамічній моделі БПА присвячена велика кількість робіт [14, 32, 34, 35, 36]. Математична модель БПА в даних роботах отримана на основі рівнянь Ньютона-Ейлера або Ейлера-Лагранжа, ці рівняння описують рух тіла в просторі, при цьому

врахований вплив гідродинамічних та гідростатичних сил і моментів, які діють на БПА через в'язкість навколишнього середовища. Можна виокремити два види запису математичної моделі, перший у вигляді диференціальних рівнянь, а також в матричному вигляді. Кожен з цих записів по своєму зручний. Наприклад, перший зручніший при декомпозиції повної моделі безпілотного підводного апарату на окремі підсистеми та подальшого створення на основі опису децентралізованих СК. Другий вид запису зручніше для розробки централізованих багатоканальних СК БПА.

Особливості БПА, як об'єкта керування при аналізі вище зазначених моделей, можна розбити на такі складові:

- Вплив гідродинамічних сил і моментів, що описуються нелінійними залежностями, наближений вигляд яких наведено в роботах [35, 36]. Дослідження, які проведені в роботі [37], показують, що коли БПА мають складні форми, а це є характерним для БПА, за рахунок багатоцільового бортового обладнання, гідродинамічні сили і моменти будуть залежати в напрямку руху БПА, а не тільки його швидкості руху, ці залежності мають складний нелінійний характер.

- Вплив приєднаних мас рідини, це означає залучення деякої кількості рідини в рух при переміщенні БПА, а це призводить до зміни інерційних параметрів БПА. Приєднанні маси і моменти інерції визначаються формою БПА [14, 35, 36]. Також треба враховувати, що величина цих мас залежить від параметрів навколишнього середовища та режиму руху БПА.

- Вплив перехресних зв'язків між ступенями свободи БПА, обумовлених наявністю коріолісових і доцентрових сил при їх русі одночасно за кількома ступенями свободи [35, 36]. Вказаний ефект отримується коли БПА рухається за криволінійними просторовим траєкторіями, величина цих сил залежить від швидкості руху БПА, чим більше швидкість руху, тим більше вплив коріолісових та доцентрових сил.

- Наявність зовнішніх збурень, а саме підводних течій. Виміряти ці збурення можливо тільки в окремих випадках, а найчастіше взагалі неможливо.

Також на динаміку БПА впливає динаміка його рушійного комплексу[35, 39]. Експериментальні дослідження [40], які були проведені дослідниками, рівняння динаміки рушійного комплексу описуються складними нелінійними залежностями, які включають не тільки параметри самого рушія, а й режими руху БПА. При цьому в більшості робіт, присвячених обліку динаміки рушійні комплексу, рушії БПА описуються за допомогою спрощених моделей, які не враховують ряд важливих ефектів, що виникають при взаємодії гвинта з в'язкою рідиною. Однак було експериментально показано, що в разі використання спрощених моделей рушія при синтезі СК БПА якість роботи реальної системи керування була незадовільна і призводила до появи автоколиваний при керуванні БПА. Тому для синтезу СК БПА необхідно якомога точніше враховувати динаміку їхніх рушіїв[38].

Існує ряд математичних моделей БПА, які описують різні випадки руху БПА [31, 35, 36, 178]. У роботі [35] описана математична модель БПА, в якій знехтували перехресними зв'язками між ступенями свободі БПА, через те що, БПА функціонував в режимі стабілізації, при малій швидкості переміщення, ці зв'язки не істотні, тому їх не враховували.

При описі математичної моделі динаміки БПА, окремо для руху в вертикальній та горизонтальній площині, як в роботах [14, 31], це призводить до спрощення моделі, але не дає змогу дослідити рух БПА при довільній просторовій траєкторії. Тому прийняття спрощень моделей динаміки безпілотного підводного апарата, не гарантує побудову якісної, високоточної СК БПА для руху БПА в довільному просторі.

Таким чином, БПА є складними багатовимірними нелінійними динамічними об'єктами, що функціонують в умовах наявності перехресних зв'язків між їх ступенями свободи, зовнішніх збурень, а також змінності і невизначеності їх параметрів. Причому зазначені негативні ефекти різко зростають при русі БПА одночасно за кількома ступенями свободи, а також при збільшенні швидкості цього руху, що призводить до необхідності їх врахування при синтезі високоточної СК для високошвидкісного руху БПА [38].

## 2.2 Підходи до синтезу системи керування підводним безпілотним апаратом.

Системи керування БПА згідно робіт [32,34] можливо розділити на три великі групи.

Перша група систем керування, яка базується на спрощених математичних моделях БПА, чи при прийнятті факту сталості окремих параметрів БПА. Перші з цих систем керування є класичні лінійні системи керування. Використання СК БПА першого типу ефективно в режимах роботи, де слабо проявляються особливості БПА, такі як наявність перехресних зв'язків, невизначеність параметрів БПА і т.д. Одним з таких режимів руху є рух за прямолінійною траєкторією, при постійній швидкості. Така СК не забезпечую бажаної якості керування, при русі БПА за складною траєкторією, але для окремих режимів, такий метод дослідження прийнятний та використовується для подальшого створення вже повних моделей руху БПА.

Другим типом системи керування є адаптивні системи, цей тип підстроює систему керування до зміни параметрів БПА, при його функціонуванні, побудова таких систем наведена в роботах [41, 42, 43]. В роботі [44], розглянуто приклад використання адаптивної системи СК БПА, для БПА торпедної форми, в горизонтальній площині, враховуючи невизначеність його гідродинамічних коефіцієнтів.

Однак незважаючи на досить високу якість керування, які забезпечують адаптивні системи, основними їх недоліками є висока складність при збільшенні числа параметрів, що настроюються, а також необхідність ідентифікації параметрів БПА в процесі їх функціонування для здійснення налаштування параметрів цих СК. Крім того, певні труднощі при синтезі таких систем викликає вибір і обґрунтування такого алгоритму налаштування параметрів СК, який забезпечить стійкість всієї системи в цілому. Тому застосування цих систем для управління БПА представляє певні складності [38].

Третій тип системи керування БПА робастні системи керування, основна їх перевага незалежність процесу керування від властивостей та параметрів об'єкта керування, це призводить до необхідної якості керування БПА за будь-яких змінах його параметрів, при завчасно встановленому діапазоні.

Основні види робастних систем керування:

1) Само-налаштовуванні системи з еталонною моделлю, принципи побудови яких наведені в роботах [45, 46, 47]. Основною особливістю СК цього типу є наявність в явному вигляді технічного пристрою (моделі), яка володіє заданими динамічними властивостями. При цьому динаміку всієї системи в цілому зводять до бажаної динаміки моделі. Такі системи знаходять застосування і в підводній робототехніці забезпечуючи якісне керування БПА за допомогою досить простих засобів без необхідності ідентифікації параметрів БПА в процесі його роботи. Як основний недолік таких систем слід відзначити наявність високочастотних коливань в контурі само-налаштування, що в деяких випадках може значно знизити якість керування [48, 49].

2) Оптимально-робастні системи керування. Даний вид системи керування досить часто використовується для керування багатовимірними динамічними об'єктами з невизначеностями різного типу, що містяться в їх математичних моделях, принципи їх побудови описані в роботах [50, 51]. Перевагою таких систем є їх досить висока робастність до невизначених параметрів БПА, проте їх синтез проводиться по лінеаризованій моделі, що обмежує їх використання для керування просторовим рухом БПА [38].

Як вже зазначалось раніше синтез системи керування БПА з урахуванням всіх особливостей його динаміки, досить складний. Щоб полегшити вирішення зазначеного завдання в роботах [32, 52] пропонується підхід, заснований на використанні методу декомпозиції.

Цей підхід передбачає розбиття всієї СК БПА на ряд окремих підсистем: підсистему керування рушіями БПА, підсистему керування швидкістю руху БПА та підсистему керування його просторовим положенням. Причому в якості об'єкта керування для підсистеми керування більш високого рівня використовується



підсистема керування нижчого рівня. Відповідно до зазначеного підходу для підсистем керування рушіями і швидкістю руху БПА вибираються робастні СК, які дозволяють описати динаміку відповідного об'єкта керування за допомогою диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами незалежно від поточних параметрів об'єкта керування, що значно полегшує синтез СК більш високого рівня. Аналіз показує, що цей підхід може бути досить ефективно використаний при синтезі високоякісних багаторівневих (ієрархічних) СК, які повинні забезпечувати високу динамічну точність переміщення БПА за довільними просторовими траєкторіями з будь-якою (в межах наявної потужності рушіїв) заданою швидкістю, причому незалежно від зміни їх параметрів і величин зовнішніх збурень, що діють на БПА з боку навколишнього в'язкого середовища [38].

Багаторівневі СК БПА, які синтезовані на основі підходи, який зазначений вище мають недоліки, СК рушіями БПА синтезуються на основі спрощеної моделі [48], без врахування взаємодії гвинта з в'язкою рідиною, це призводить до зменшення динамічної точності, а надалі це призведе до зниження якості роботи усієї системи керування БПА.

При цьому високу точність руху БПА по просторовим траєкторіях при використанні зазначеної робастної СК можна забезпечити тільки в разі, коли рушії БПА можуть відпрацювати сигнали керування, що формуються цієї СК. У свою чергу величини цих сигналів залежать від швидкості руху БПА по траєкторіях, а також від кривизни поточної ділянки траєкторії руху. Тому для гарантованого збереження бажаної точності руху БПА по просторовим траєкторіях необхідно розробити методи і системи автоматичного формування режиму (швидкості) руху БПА по просторовим траєкторіям, які дозволять запобігти вхід їх рушіїв в насичення [38].

Іншим підходом є синтез простих СК, вони можуть містити лінійні регулятори, для БПА які мають торпедну форму та виконують швидкісний рух за траєкторією, рушійний комплекс таких БПА забезпечує рух за обмеженою кількістю ступенів свободи.

Одні з таких БПА приведені на рис. 2.2.1.



Рис. 2.2.1 - Приклади БПА, призначених для руху за протяжною траєкторією

Вказані особливості таких БПА забезпечують їм зниження величини негативних взаємодій БПА з в'язким середовищем та взаємовпливів між їх ступенями свободи. При цьому СК цих БПА повинні враховувати особливості конструкції їх рушійних комплексів і обмеження маневреності БПА, пов'язані з обмеженою кількістю їх ступенів свободи. Однак використання більш простих СК призводить до значного зниження точності роботи при збільшенні швидкості руху БПА по просторовим траєкторіям, навіть коли їх рушії не входять в насичення. Тому для підвищення точності руху зазначених БПА по криволінійних траєкторіях необхідно розробляти нові методи формування програмних сигналів руху, відпрацювання яких за допомогою простих СК навіть з великою помилкою все одно забезпечить рух цих БПА по просторовим траєкторіям із заданою точністю[38].

### 2.3 Математична модель безпілотного підводного апарату

Дослідження повної математичної моделі руху безпілотного підводного апарату, як зазначалось раніше, є досить складним. Тому, для дослідження та синтезу системи керування БПА, буде використано математичну модель та структуру системи керування приведену у роботі [53].

В даній роботі просторовий рух БПА розглядається, як суперпозицію поступального руху його полюса і обертального руху навколо полюса. Надалі буде розглядатися тільки обертаний рух БПА, який задається трьома послідовними поворотами системи координат  $Ox_{uz}$ , зв'язаної з БПА, на кути  $\psi$  курсу,  $\vartheta$  диференту та  $\gamma$  крену відносно системи координат  $Ox_g y_g z_g$  наполовину зв'язаної з БПА.

Система координат  $Ox_g y_g z_g$  задана наступним чином: вершина  $O$  поєднана з центром мас БПА (полюсом), вісь  $Ox_g$  направлена на північ по дотичній до меридіану,  $Oz_g$  - по дотичній до паралелі на схід, вісь  $Oy_g$  - вздовж вертикалі місця вгору. Поліус пов'язаної з БПА системи координат  $Ox y z$ , також як і  $Ox_g y_g z_g$  збігається з центром мас БПА, вісь  $Ox$  спрямована уздовж поздовжньої осі в носову частину апарату, вісь  $Oy$  лежить в діаметральній площині БПА і спрямована вгору, вісь  $Oz$  спрямована на правий борт.

Згідно роботи [53] будемо розглядати традиційний підхід до керування орієнтацією БПА. Тому кінематичні рівняння руху БПА задані рівняннями Єйлера:

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{1}{\cos(\vartheta)} [\omega_y \cos(\gamma) - \omega_z \sin(\gamma)]; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin(\gamma) + \omega_z \cos(\gamma); \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - tg(\vartheta) [\omega_y \cos(\gamma) - \omega_z \sin(\gamma)],\end{aligned}\tag{2.3.1}$$

Де  $\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma}$  кутові швидкості по курсу, диференту, крену відповідно, а  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – кутові швидкості обертання БПА навколо осей  $Ox, Oy, Oz$ .

В якості моделі динаміки БПА будемо розглядати спрощену математичну модель руху апарату [54-55], зручну для аналізу і при цьому адекватно відображаючи процеси, що відбуваються в каналах руху апарату:

$$\begin{aligned}(J_x + \lambda_{44}) \dot{\omega}_x &= M_{двх} + M_{ах} + M_{вх} + M_{гх}; \\ (J_y + \lambda_{55}) \dot{\omega}_y &= M_{дву} + M_{ау} + M_{ву} + M_{гу}; \\ (J_z + \lambda_{66}) \dot{\omega}_z &= M_{двz} + M_{аз} + M_{вz} + M_{гz},\end{aligned}\tag{2.3.2}$$

де  $J_x, J_y, J_z$  та  $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$  – моменти інерції і приєднані моменти інерції БПА навколо осей  $Ox, Oy, Oz$  відповідно;

$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – кутові прискорення БПА навколо осей  $Ox, Oy, Oz$  відповідно;

$M_{двх}, M_{дву}, M_{двz}, M_{ах}, M_{ау}, M_{аз}, M_{вх}, M_{ву}, M_{вz},$  та  $M_{гх}, M_{гу}, M_{гz}$  – моменти від сили тяги рушіїв, сили Архімеда, збурюючі сили та гідродинамічних сил опору навколо осей  $Ox, Oy, Oz$  відповідно.

З огляду на те, що однією з вимог до БПА, керованим при великих кутах нахилу, являється малість відновлюваного моменту від сили Архімеда, то для

спрощення можна прийняти, що метацентрична висота апарату рівна нулю і моменти від сили Архімеда відсутні  $M_{ax}, M_{ay}, M_{az} = 0$  [53].

Моменти  $M_{gx}, M_{gy}, M_{gz}$  від гідродинамічних сил опору, представимо у вигляді:

$$M_{gi} = -C_{\omega_{i1}} \cdot \omega_i |\omega_i| - C_{\omega_{i2}} \cdot \omega_i, \text{ для } i = x, y, z, \quad (2.3.3)$$

де  $C_{\omega_{i1}}, C_{\omega_{i2}}$  – приведені гідродинамічні коефіцієнти.

Після лінеаризації (2) отримаємо наступні передатні функції каналів кутового руху БПА:

$$W_{\text{ПА}i} = \frac{\omega_i(p)}{M_{\text{дв}i}(p)} = \frac{K_{\text{ПА}i}}{T_{\text{ПА}i}p + 1}, \quad (2.3.4)$$

де:

$$T_{\text{ПА}i} = \frac{J_i + \lambda_{jj}}{2C_{\omega_{i1}} \omega_i^* + C_{\omega_{i2}}}; \quad K_{\text{ПА}i} = \frac{1}{2C_{\omega_{i1}} \omega_i^* + C_{\omega_{i2}}}$$

$\omega_i^*$  - параметр лінеаризації,  $i = x, y, z; j = 4, 5, 6$ .

Моменти, створювані рушійно-рульовим комплексом, можна записати в наступному вигляді:

$$M_{\text{дв}i} = \sum F_{\text{дв}j} h_j, \text{ де } i = x, y, z; j = 1..n, \quad (2.3.5)$$

де  $n$  – кількість руху,  $F_{\text{дв}j}$  – сила тяги  $j$  – го рушія, а  $h_j$  – плече, відповідаючи цій силі.

Так як відповідно до робіт [54-55] динаміка рушія описується диференціальним рівнянням 1-го порядку, то запишемо передавальну функцію рушіїв БПА у вигляді:

$$W_{\text{дв}i} = \frac{M_{\text{дв}i}(p)}{U_i(p)} = \frac{K_{\text{дв}i}}{T_{\text{дв}i}p + 1}, \quad (2.3.6)$$

де  $T_{\text{дв}i}, K_{\text{дв}i}$  - постійна часу і коефіцієнт підсилення рушіїв, які керують рухом по  $i$ -му каналу відповідно;  $U_i$  – напруга, задана на рушії.

У відповідності (4), (6) для подальших розрахунків математичну модель БПА можна прийняти у вигляді аперіодичної ланки другого порядку[53]. Також в роботі представлена структурна схема системи керування БПА, яка відповідає традиційному підходу [рис. 1 - 53].

Отже, провівши аналіз особливостей БПА, як об'єкта керування, підходи та методи синтезу систем керування БПА, за різних режимів роботи та розглянуту математичну модель динаміки БПА, доцільно приступити до створення структурної схеми керування БПА, за вже існуючими та її подальшого дослідження та моделювання. В данні роботі буде проведено дослідження структурної моделі керування кутом курсу безпілотного підводного апарата, БПА буде розглядатися як об'єкт керування, математична модель якого буде задаватися передатною функцією згідно його рівняння динаміки.

## 2.4 Структурна схема керування кутом курсу безпілотного підводного апарата.

Провівши аналіз підходів до синтезу систем керування БПА, а також проаналізувавши його математичну модель, рівняння динаміки та розглянувши існуючі структурні схеми було створено СК кутом курсу БПА. Структурна схема зображена рис. 2.4.1.

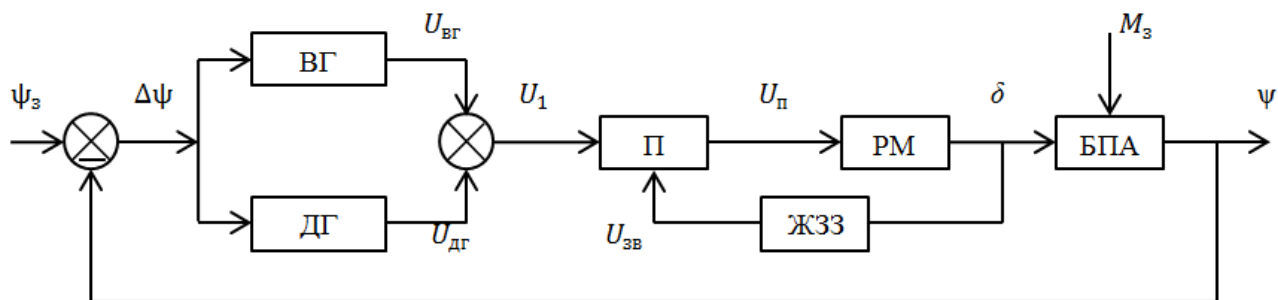


Рис. 2.4.1 – Структурна схема керування кутом курсу БПА

Елементи системи, які зображені на структурній схемі:

ВГ – вільний гіроскоп(датчик кута); ДГ – диференційний гіроскоп(датчик кутової швидкості); П – підсилювач; РМ – рульова машина; ЖЗЗ – жорсткий зворотній зв'язок; БПА – безпілотний підводний апарат(об'єкт керування);  $\psi_3$  – задане значення кута курсу;  $\psi$  – дійсне значення куту курсу;  $U_{вг}, U_{дг}, U_1, U_{п}, U_{зв}$  – напруги постійного струму, яка повільно змінюється;  $\delta$  – кут відхилення

руля(рушія);  $M_3$  – зовнішній момент(гідродинамічний момент сил опору), може бути прийнятий сталим у часі, як указано в роботі [53].

Як видно з рис. 2.4.1 на вхід системи подається задане значення кута курсу, а на виході системи дійсне значення кута курсу, при зміні заданого кута курсу, на вільний та диференційний гіроскопи подається значення  $\Delta\psi$ , яке є різницею значень вхідного та дійсного кута курсу. Після чого вихідні сигнали з гіроскопів додаються та подаються на підсилювач системи, далі сигнал з підсилювача поступає на рульову машину, на виході якої отримуємо кут відхилення руля(рушія). Жорсткий зворотній зв'язок у блоці підсилювача та рульової машини, вертає значення кута відхилення рульової машини на підсилювач для отримання різниці вхідної та вихідної величини кута відхилення руля машини, це зроблено для покращення регулювання. Значення кута відхилення рульової машини подається на об'єкт керування(БПА), після чого при дії зовнішнього моменту на об'єкт, отримуємо значення дійсного кута курсу.

Для того щоб дослідити задану структурну схему, треба отримати передатні функції елементів системи, знайти розімкнену передатну функцію, передатну функцію за похибкою, перевірити систему на стійкість, за одним з критеріїв стійкості та дослідити вплив зовнішнього збурення на керування БПА, промодельовавши дану систему і отримавши відповідні графіки та похибки. Але спочатку треба записати вихідні сигнали елементів системи.

Для ВГ:

$$U_{\text{вг}} = k_{\text{вг}}\Delta\psi; \quad (2.4.1)$$

Для ДГ:

$$U_{\text{дг}} = k_{\text{дг}} \frac{d\Delta\psi}{dt}; \quad \Delta\psi = \psi_3 - \psi; \quad (2.4.2)$$

Для ЖЗЗ:

$$U_{\text{зв}} = k_{\text{зв}}\delta; \quad (2.4.3)$$

Для П:

$$U_{\text{п}} = k_{\text{п}}(U_1 - U_{\text{зв}}), \text{ де } U_1 = U_{\text{вг}} - U_{\text{дг}}; \quad (2.4.4)$$

Для РМ:

$$T_{\text{рм}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{d\delta}{dt} = k_{\text{рм}} U_{\text{п}}; \quad (2.4.5)$$

Для БПА:

$$T_{\text{БПА}} \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{d\psi}{dt} = k_{\text{БПА}} \delta - k_M M_3; \quad (2.4.6)$$

Значення коефіцієнтів згідно завдання обрані наступні:

$$k_{\text{рм}} = 20 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}; k_{\text{вг}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{рад}}; k_{\text{дг}} = 0,5 \text{ В} \cdot \frac{\text{с}}{\text{рад}}; k_{\text{п}} = 20; k_{\text{зв}} = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{рад}}; T_{\text{рм}} = 0 \text{ с};$$

$$k_{\text{БПА}} = 1 \frac{1}{\text{с}}; k_M = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}}; M_3 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}; T_{\text{БПА}} = 2 \text{ с};$$

Встановивши рівняння елементів системи та коефіцієнти системи, переходимо до знаходження передатних функцій елементів. Передатною функцією ланки (системи) називається відношення перетворення Лапласа вихідної величини до вхідної при нульових початкових умовах.

$$W(p) = \frac{X_2(p)}{X_1(p)}; \quad (2.4.7)$$

де  $X_2(p), X_1(p)$  – вихідна та вхідна величина перетворення Лапласа відповідно.

Знайдемо передатні функції кожного з елементів системи:

Вільний гіроскоп:

$$W_{\text{вг}}(p) = k_{\text{вг}}; \quad (2.4.8)$$

Диференційний гіроскоп:

$$W_{\text{дг}}(p) = pk_{\text{дг}}; \quad (2.4.9)$$

Жорсткий зворотній зв'язок:

$$W_{\text{жзз}}(p) = k_{\text{зв}}; \quad (2.4.10)$$

Підсилювач:

$$W_{\text{п}}(p) = k_{\text{п}}; \quad (2.4.11)$$

Рульова машина:

$$T_{\text{рм}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{d\delta}{dt} = k_{\text{рм}} U_{\text{п}};$$

Перейшовши до зображення Лапласа отримаємо:

$$T_{\text{PM}} p^2 \delta(p) + p \delta(p) = k_{\text{PM}} U_{\text{П}}(p);$$

Тоді передатна функція РМ:

$$W_{\text{PM}}(p) = \frac{k_{\text{PM}}}{p(T_{\text{PM}} p + 1)}; \quad (2.4.12)$$

Але через те, що  $T_{\text{PM}} = 0$  можна одразу записати передатну функцію РМ з прийнятим врахуванням:

$$W_{\text{PM}}(p) = \frac{k_{\text{PM}}}{p}. \quad (2.4.13)$$

Безпілотний підводний апарат:

$$T_{\text{БПА}} \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{d\psi}{dt} = k_{\text{БПА}} \delta - k_M M_3;$$

Перейшовши до зображення Лапласа отримаємо:

$$T_{\text{БПА}} p^2 \psi(p) + p X_2(p) = k_{\text{БПА}} \delta(p) - k_M M_3(p);$$

Враховуючи, що  $k_{\text{БПА}} = 1$  та  $k_M = 1$  запишемо передатну функцію:

$$W_{\text{БПА}}(p) = \frac{1}{p(T_{\text{БПА}} p + 1)}; \quad (2.4.14)$$

Після знаходження усіх передатних функцій елементів, потрібно перетворити схему, об'єднавши послідовні та паралельні ланки системи.

Запишемо загальну передатну функцію для ДГ та ВГ, як передатну функцію паралельних ланок, яка є сумою їх передатних функцій:

$$W_{\text{ВГ+ДГ}}(p) = p k_{\text{ДГ}} + k_{\text{ВГ}} = 0,5p + 1; \quad (2.4.15)$$

Знайдемо загальну передатну функцію ланок охоплених жорстким зворотнім зв'язком. Передатна функція знаходиться за такою формулою:

$$W_*(p) = \frac{W_{\text{П}} W_{\text{PM}}}{1 + W_{\text{П}} W_{\text{PM}} W_{\text{ЖЗЗ}}}; \quad (2.4.16)$$

Підставивши вирази та виконавши усі необхідні перетворення запишемо кінцеву передатну функцію:

$$W_*(p) = \frac{k^*}{T^* p + 1}, \quad (2.4.17)$$



де  $k^* = \frac{1}{k_{зв}}$ ,  $T^* = 1/k_{п}k_{рм}k_{зв}$ .

Після знаходження усіх передатних функцій елементів та виконання перетворень отримаємо таку схему, для знаходження передатної функції розімкнутої системи зображену на рис. 2.4.2.

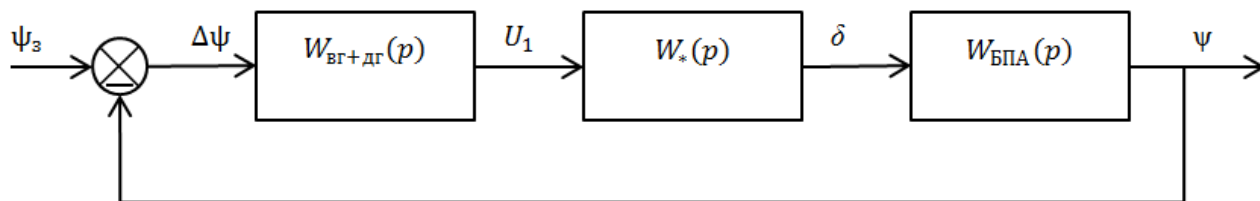


Рис. 2.4.2 - Структурна схема після перетворень

Формула для знаходження передатної функції розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{роз}(p) = W_{вг+дг}(p) \cdot W_*(p) \cdot W_{бпа}(p); \quad (2.4.18)$$

Підставивши вирази (2.4.14), (2.4.15), (2.4.17) у формулу (2.4.18) отримаємо таку передатну функцію системи:

$$W_{роз}(p) = \frac{k_{роз}(pk_{дг} + 1)}{p(T_{бпа}p + 1)(T^*p + 1)}; \quad (2.4.19)$$

Для того, щоб надалі провести перевірку на стійкість системи за критеріями Гурвіца потрібно знайти передатну функцію замкненої системи. Так як, зворотній зв'язок в системі одиничний, запишемо формулу для знаходження передатної функції замкненої системи:

$$\Phi(p) = \frac{W_{роз}(p)}{1 + W_{роз}(p)}; \quad (2.4.20)$$

Підставивши у формулу (2.4.20) вираз для передатної функції розімкнутої системи отримаємо:

$$\Phi(p) = \frac{k_{роз}(pk_{дг} + 1)}{p(T_{бпа}p + 1)(T^*p + 1) + k_{роз}(pk_{дг} + k_{вг})}. \quad (2.4.21)$$

Для того, щоб надалі провести перевірку на стійкість підставимо значення коефіцієнтів у передатну функцію замкненої системи:

$$\Phi(p) = \frac{20(0,5 + 1)}{p(0,05p + 1)(2p + 1) + 20(0,5p + 1)}; \quad (2.4.22)$$

Для того щоб дослідити систему на стійкість за критерієм Гурвіца потрібно отримати характеристичний поліном замкнутої системи. Запишемо характеристичний поліном замкнутої системи, для цього розкриємо дужки та зведемо коефіцієнти при степенях, отжимаємо:

$$D(p) = 0,1p^3 + 2,05p^2 + 11p + 20; \quad (2.4.23)$$

Для того, щоб перевірити систему на стійкість, за критерієм Гурвіца, потрібно побудувати матрицю Гурвіца. Вона будується за таким алгоритмом:

1. По головній діагоналі розташовуються коефіцієнти характеристичного полінома  $a_1 \dots a_n$ .
2. Стівпці матриці добудовуються з зменшення індексів зверху вниз, в стівпці індекси яких більше за  $n$  або менше нуля, ставиться нуль.

За критерієм Гурвіца, для того щоб система була стійка, необхідна умова, щоб усі коефіцієнти характеристичного полінома були більше за нуль, а також  $n$  діагональних мінорів, теж мають бути більше за нуль.

Знайдемо значення мінорів:

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,05 & 20 & 0 \\ 0,1 & 11 & 0 \\ 0 & 2,05 & 20 \end{bmatrix} = 411 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,05 & 20 \\ 0,1 & 11 \end{bmatrix} = 20,55 > 0;$$

$$\Delta_1 = a_1 = 2,05 > 0.$$

Можна зробити висновок, що система стійка, адже усі мінори і коефіцієнти характеристичного полінома більше нуля.

Для більшої достовірності потрібно побудувати логарифмічну амплітудну та фазову частотну характеристики розімкненої системи, також це дає змогу оцінити запас стійкості системи.

Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ представлені на рис. 2.4.1. З них видно, що система є стійкою. Фазочастотна характеристика системи не пересікає відмітки 180 градусів, це каже про достатній запас стійкості по амплітуді.

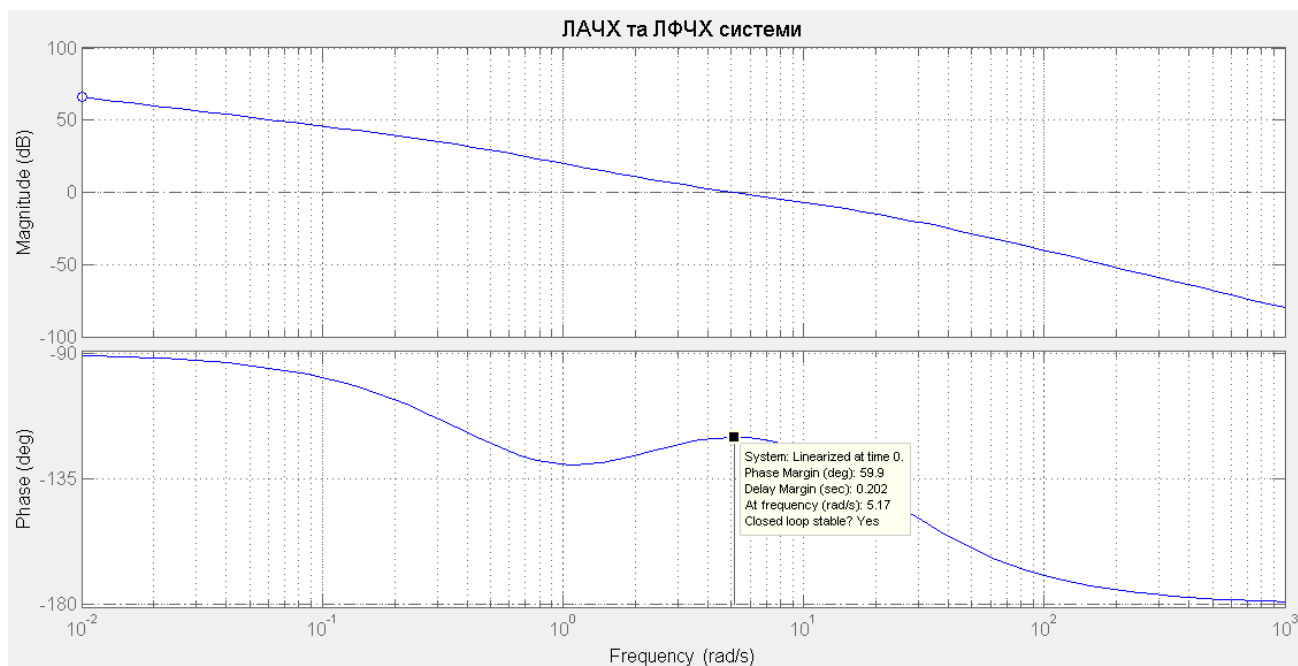


Рис. 2.4.1 – Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

Для того, щоб оцінити запас стійкості по фазі, треба визначити де графік амплітудної характеристики пересікає нульову відмітку, в цій точці на фазовій характеристиці і визначає запас стійкості, відстанню до відмітки  $180^\circ$ . Як видно з графіку вище Запас стійкості по фазі  $\varphi=59,9^\circ$ .

## Висновки до розділу 2

У другому розділі був проведений аналіз особливостей БПА, як об'єкта керування, наведене основні впливи на БПА при складанні його математичної моделі. Проаналізувавши підходи до синтезу систем керування БПА, була обрана перша група методів, яка базується на спрощених моделях БПА, за рахунок сталості його коефіцієнтів, потім описавши спрощену математичну модель БПА, було обрано структурну схему для дослідження, а саме схему керування кутом курсу БПА.

Проведений аналіз рівнянь динаміки кожного з елементів системи, на їх базі знайдені передатні функції елементів, після чого, перетворивши схему об'єднавши паралельні ланки та послідовні ланки системи було знайдено передатну функції розімкнутої системи. Далі для того, щоб виконати перевірку системи на стійкість,

була знайдена передатна функція замкненої системи та її характеристичний поліном. Побудувавши визначники матриці Гурвіца були знайдені їх значення, які кажуть про те що система стійка.

Для достовірності результатів було побудовано логарифмічні характеристики розімкнутої системи, з яких видно що система стійка, запас по амплітуді достатній, запас по фазі дорівнює  $59,9^\circ$ .

## РОЗДІЛ 3

### Моделювання системи керування кутом курсу для різних режим руху безпілотного підводного апарату

Надалі користуючись знайденими передатними функціями, а також структурною схемою керування кутом курсу, буде проведено моделювання системи керування, для цього буде обрано середовища моделювання, після чого буде змодельована дана система керування та отримані результати у вигляді графіків, чисел та похибок, для різних режимів роботи

#### 3.1 Вибір середовища моделювання

Для розробки системи керування кутом курсу безпілотного підводного апарату найбільш підходить програмне забезпечення MatLab і його пакет Simulink. Цей пакет є одним з кращих пакетів моделювання динамічних систем [57].

Програмне забезпечення (ПЗ) Matlab (Matrix Laboratory) розроблялося як діалогова середовище для матричних обчислень. Операційне середовище дозволяє формулювати проблеми і отримувати рішення в математичній формі, не вдаючись до рутинного програмування. Пакет оснащений хорошою графічною системою і посилений різними пакетами розширень (Toolboxes) для ефективної роботи зі спеціальними класами задач. Серед пакетів розширень можна виділити бібліотеки для обробки сигналів: Communicational і Signal Processing Toolboxes. Особливе місце займає SIMULINK - пакет Matlab для моделювання та аналізу динамічних систем [56].

Пакет Simulink є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем і пристроїв, представлених своєї функціональної блок-схемою, що називається S-

моделлю, або просто моделлю. При цьому можливі різні варіанти моделювання: в тимчасовій області, в частотній області, на основі спектральних перетворень Фур'є, з використанням методу Монте-Карло (реакція на дії випадкового характеру) і т.д. Для побудови функціональної блок-схеми модельованих пристроїв Simulink має велику бібліотеку і зручний редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача і по суті є типовим засобом візуально-орієнтованого програмування. Використовуючи палітри компонентів (набори), користувач за допомогою миші переносить потрібні блоки з палітр в робоче вікно пакета Simulink і з'єднує лініями входи і виходи блоків. Таким чином, створюється блок-схема системи або пристрої, тобто модель [56,57].

Simulink автоматизує наступний, найбільш трудомісткий етап моделювання: він становить і вирішує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (модель), забезпечуючи зручний і наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою. Досить уточнити вид аналізу і запустити Simulink в режимі симуляції, створеної моделі або пристрою. Засоби візуалізації результатів моделювання в пакеті Simulink дуже наочні. Більш того, Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі в міру введення її нових блоків, навіть в тому випадку, коли цей процес супроводжується зміною порядку системи рівнянь і веде до істотного якісного зміни поведінки системи. Втім, це є однією з головних цілей пакета Simulink [56,57].

Цінність Simulink полягає і у великій, відкритій для вивчення і модифікації бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела сигналів з практично будь-якими часовими залежностями, масштабуючи, лінійні і нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передавальних характеристик, Квант пристрій, що інтегрують і диференційні блоки і т.д. У бібліотеці є цілий набір віртуальних пристроїв - від простих вимірювачів типу вольтметра або амперметра до універсальних осцилографів, що дозволяють переглядати тимчасових характеристики залежності вихідних параметрів модельованих систем - наприклад, струмів і напруг, переміщень, тисків і т.п. Є графічний пристрій для створення фігур

в полярній системі координат. У додаткових бібліотеках є імітатори приладів, як аналізатор спектру складних графіків [56,57].

Засоби графічної анімації Simulink дозволяє будувати віртуальні фізичні лабораторії з наочним кончиною результатів моделювання. Можливості Simulink охоплює завдання математичного моделювання складних динамічних систем у фізиці, радіотехніці, в біології і хімії, тобто у всіх областях науки і техніки. Цим пояснюється популярність даного пакета як в університетах та інститутах, так і в наукових лабораторіях. Важливою перевагою пакета є можливість завдання в блоках довільних математичних виразів, що дозволяється вирішувати типові завдання, користуючись прикладами пакета Simulink або ж просто задаючи нові вирази, що описують роботу модельованих користувачем систем і пристроїв. Важливою властивістю пакету є і можливість завдання системних функцій (S-функцій) з включенням їх до складу бібліотек Simulink. Необхідно відзначити також можливість моделювання пристроїв і систем в реальному масштабі часу [56,57].

Важливе значення Simulink - це інтеграція не тільки з системою MATLAB, а й з рядом інших пакетів розширення, що забезпечує, по суті, необмежені можливості застосування Simulink для вирішення практично будь-яких завдань імітаційного моделювання.

### 3.2 Моделювання в середовищі Simulink

Використовуючи структурну схему керування, а також знайдені передатні функції, побудуємо в середовищі Simulink систему керування кутом курсу БПА, яка зображена на рис. 3.2.1.

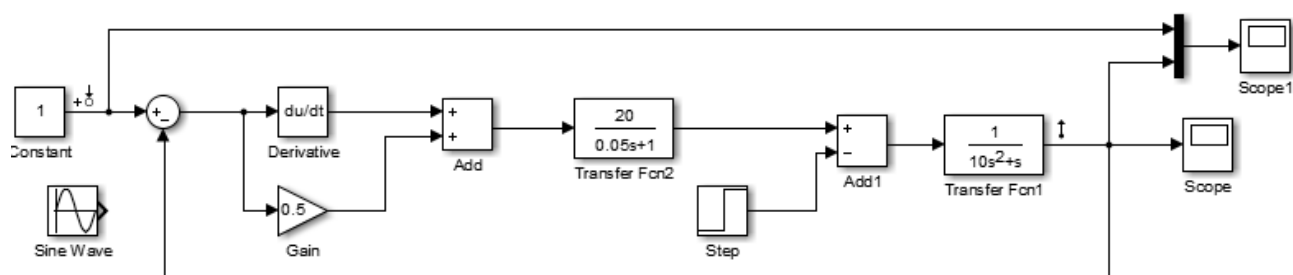
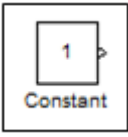
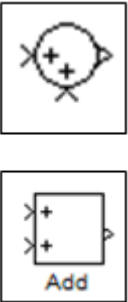
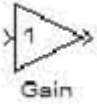








Рис. 3.2.1 – Система керування кутом курсу БПА в середовищі Simulink

Опишемо блоки, які присутні у цій системі табл. 3.2.1

Табл. 3.2.1 Опис використаних блоків в середовищі Sinulink

	<p>Константа - задає постійний за рівнем сигнал. У цьому блоці буде задаватися вхідне значення кута курсу.</p>
	<p>Суматор - виконує обчислення суми поточних значень сигналів.</p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Icon shape - форма блоку. Вибирається зі списку. round - коло, rectangular - прямокутник.</li> <li>List of sign - список знаків. У списку можна використовувати такі знаки: + (плюс), - (мінус) і   (Роздільник знаків).</li> </ol>
	<p>Підсилювач – виконує множення вхідного сигналу на постійний коефіцієнт.</p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Gain - коефіцієнт посилення.</li> <li>Multiplication - спосіб виконання операції. Може приймати значення (зі списку): Element-wise <math>K \cdot u</math> – по-елементний. Matrix <math>K \cdot u</math> – матричний.</li> </ol>
	<p>Мультиплексор - об'єднує вхідні сигнали в вектор</p> <p>параметри:</p> <p>Number of Inputs - кількість входів.</p> <p>Display option - спосіб відображення.</p>
	<p>Диференціювання - виконує чисельне диференціювання вхідного сигналу.</p>
	<p>Блок передавальної характеристики Transfer Fcn задає передавальну функцію у вигляді відношення поліномів.</p> <p>Параметри:</p>



	<p>Numerator - вектор або матриця коефіцієнтів полінома чисельника.</p> <p>Denominator вектор коефіцієнтів полінома знаменника.</p> <p>Absolute tolerance - Абсолютна похибка.</p> <p>Порядок чисельника не повинен перевищувати порядок знаменника.</p>
	<p>Будує графіки досліджуваних сигналів в функції часу. Дозволяє спостерігати за змінами сигналів в процесі моделювання.</p>
	<p>Формує синусоїдальний сигнал із заданою частотою, амплітудою, фазою і зміщенням.</p> <p>Параметри:</p> <p>Amplitude - Амплітуда.</p> <p>Bias - Постійна складова сигналу.</p> <p>Frequency (rads / sec) - Частота (рад / с).</p> <p>Phase (rads) - Початкова фаза (рад).</p> <p>Sample time - Крок модельного часу. Використовується для узгодження роботи джерела і інших компонентів моделі в часі.</p>
	<p>Формує ступінчастий сигнал.</p> <p>Параметри:</p> <p>Step time - Час настання перепаду сигналу (с).</p> <p>Initial value - Початкове значення сигналу.</p> <p>Final value - Кінцеве значення сигналу.</p>

У структурній схемі за допомогою блоків Sine Wave, Constant та Step1 будуть задаватися вхідні значення кута курсу. Блоки Derivative, Gain та Add реалізують форсовану ланку, яка складається з сигналів вільного та диференційного гіроскопа. Блок Transfer Fcn 2 реалізується передатна функція для блоків РМ, ЖЗЗ та П після знаходження загальної передатної функції для цих елементів. У Transfer Fcn 1 реалізується передатна функція для безпілотного підводного апарата, у Step задається момент зовнішнього збурення, який діє на об'єкт керування. Блоки Scope та Scope 1 потрібні для виводу результатів моделювання. Вивід графік з Scope буде реалізований за допомогою m - файлу через Workspace в блоці Scope.

Після опису блоків, які застосовані у структурній схемі керування кутом курсу, переходимо до моделювання різних режимів роботи БПА.

### 3.3 Моделювання режиму роботи при постійному значенні кута курсу безпілотного підводного апарату

Для того, щоб дослідити, як поводить себе система при постійному значенні заданого курсу, задамо в блок constant значення в  $1^\circ$ , спочатку проведемо дослідження без дії зовнішнього моменту. Отримаємо графік перехідного процесу зображений на рис. 3.3.1:

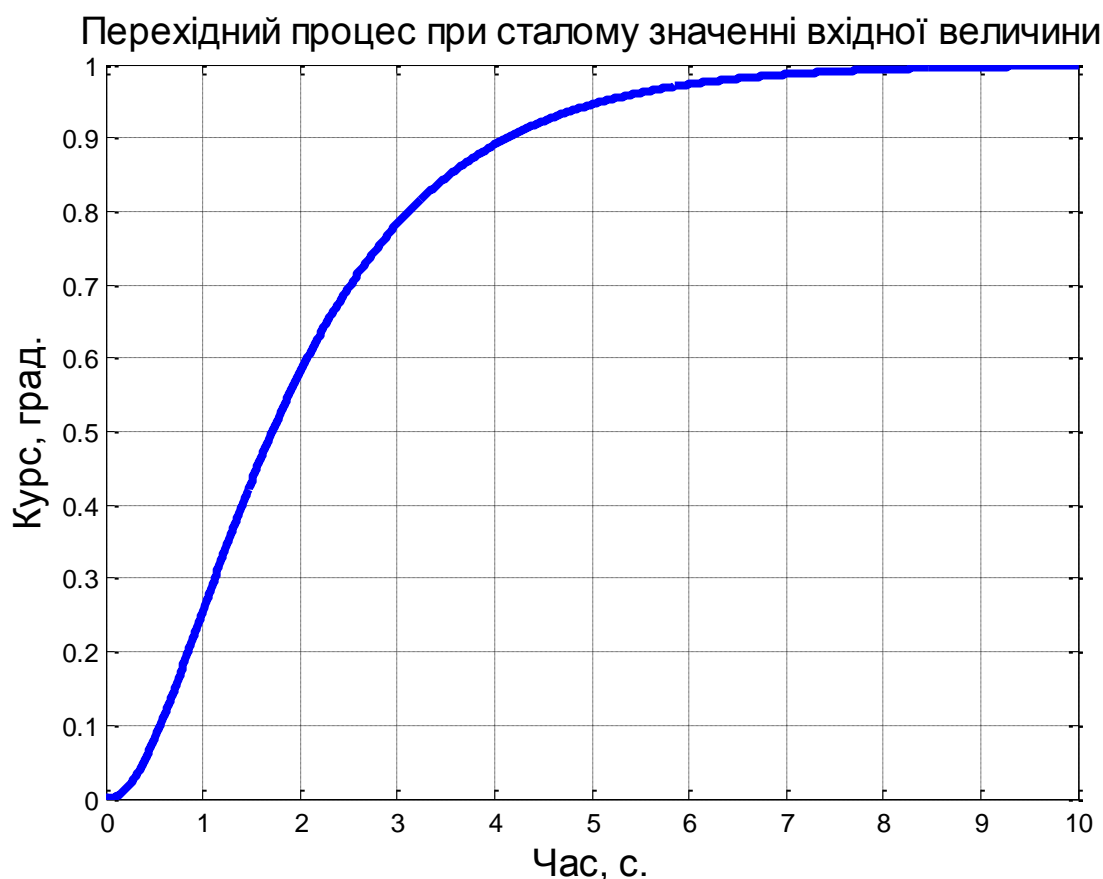


Рис. 3.3.1 – Графік перехідного процесу при сталому значенні вхідної величини, без дії зовнішнього моменту

Як бачимо, система на протязі 10 секунд відпрацьовує значення заданого кута курсу та після перехідного процесу, вихідне значення наростає до значення вхідного кута курсу в  $1^\circ$ .

Тепер задамо значення заданого кута курсу як одиничний стрибок в момент часу 3 с, результат показаний на рис. 3.3.2.

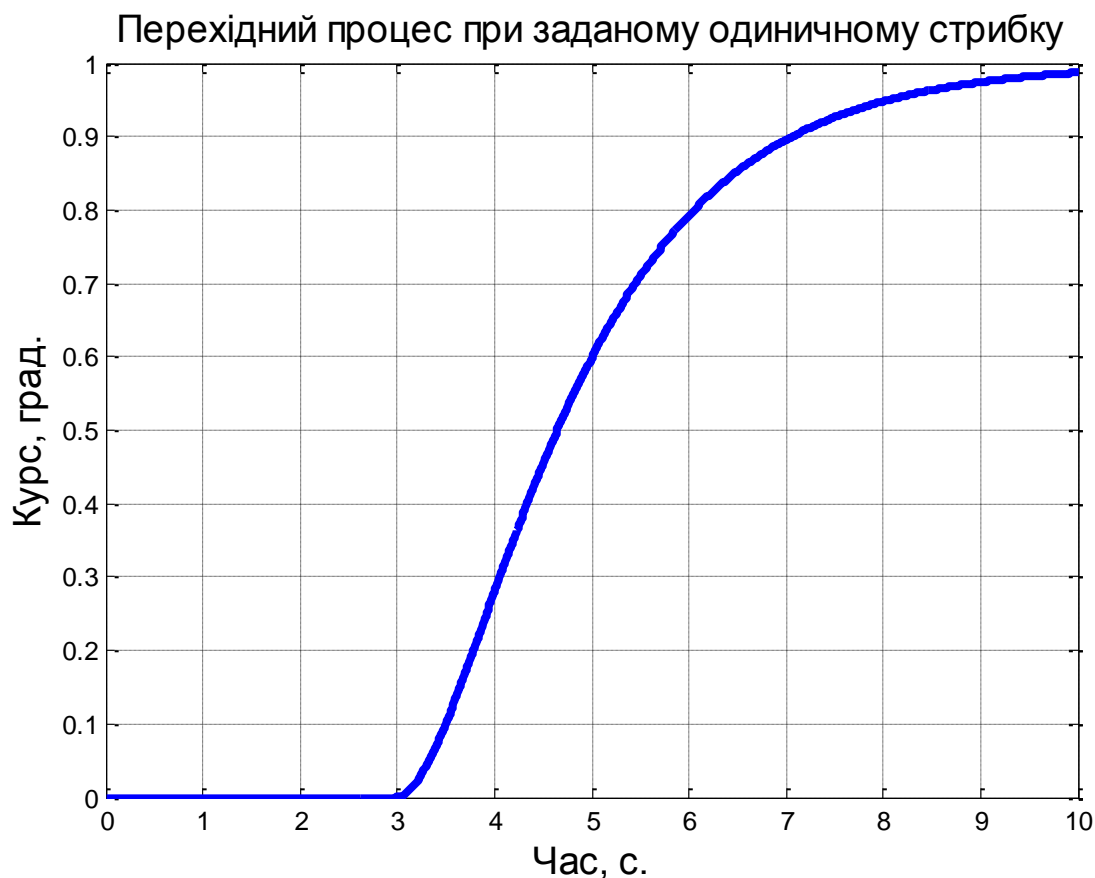


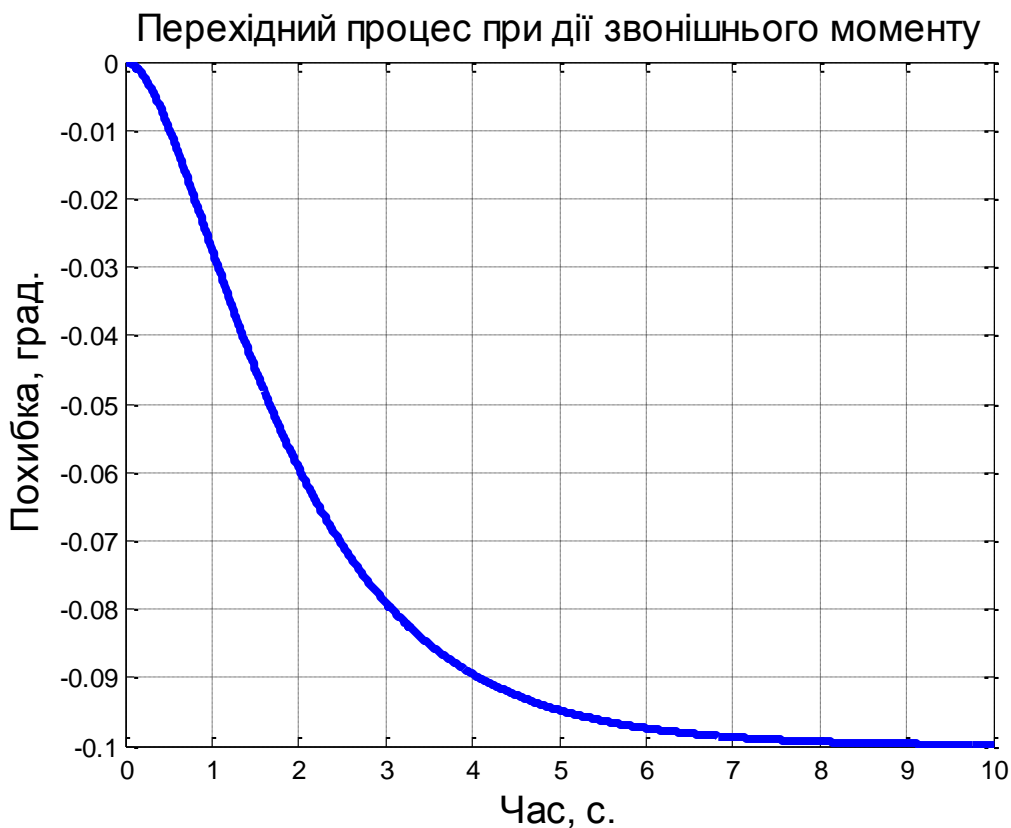
Рис. 3.3.2 - Графік перехідного процесу при одиничному стрибку

Як видно з графіку рис. 3.3.2, поки значення вхідного сигналу дорівнювало нулю, система знаходилася в стані спокою, після дії стрибка в момент часу 3 сек, значення вихідного сигналу стало наростати до величини стрибка в  $1^\circ$ . Після чого встановилася в значенні  $1^\circ$ . Це каже про те, що система після прикладання до неї вхідного значення курсу, виводить заданий об'єкт керування на значення вхідного сигналу, доти поки різниця сигналів не буде дорівнювати нулю.

Отже, можна зробити висновок, що при відсутності дії зовнішнього моменту та прикладанні початкового значення вхідного сигналу(курсу) система виводить об'єкт керування на задану величину курсу та надалі зберігає його значення незмінним. Все каже про правильність системи керування кутом курсу.

Для того, щоб дослідити вплив зовнішнього моменту, спочатку треба промоделювати роботу системи при нульовому значенні вхідного сигналу та дії

зовнішнього моменту. Задамо дію зовнішнього моменту величиною 1 Н·м, починаючи з нульового моменту роботи, результат показаний на рис. 3.3.3.



т

Рис. 3.3.3 – Графік перехідного процесу при дії зовнішнього моменту

З рис. 3.3.3 видно, що при прикладанні зовнішнього моменту до системи керування виникає похибка регулювання, величиною  $0,1^\circ$ . Після знаходження розімкнутої передатної функції системи видно, що система астатична першого порядку, а це означає, що при впливі постійного зовнішнього збурення, похибка регулювання має дорівнювати нулю. На графіках цього не видно і похибка присутня. Це викликано тим, що при дії зовнішнього моменту в точці прикладання системи, буде виникати відсутність астатизму системи через цей зовнішній момент. По відношенню до зовнішнього моменту система є статичною

Тому можна сказати, що при дії зовнішнього моменту система поводить себе, як статична, тоді похибка регулювання буде дорівнювати константі. Зменшити цю похибку можна за допомогою збільшення коефіцієнту розімкнутої системи.

Тепер подамо на вхід системи стале значення кута курсу та будемо прикладати зовнішній момент. Отримаємо результати на рис. 3.3.4.

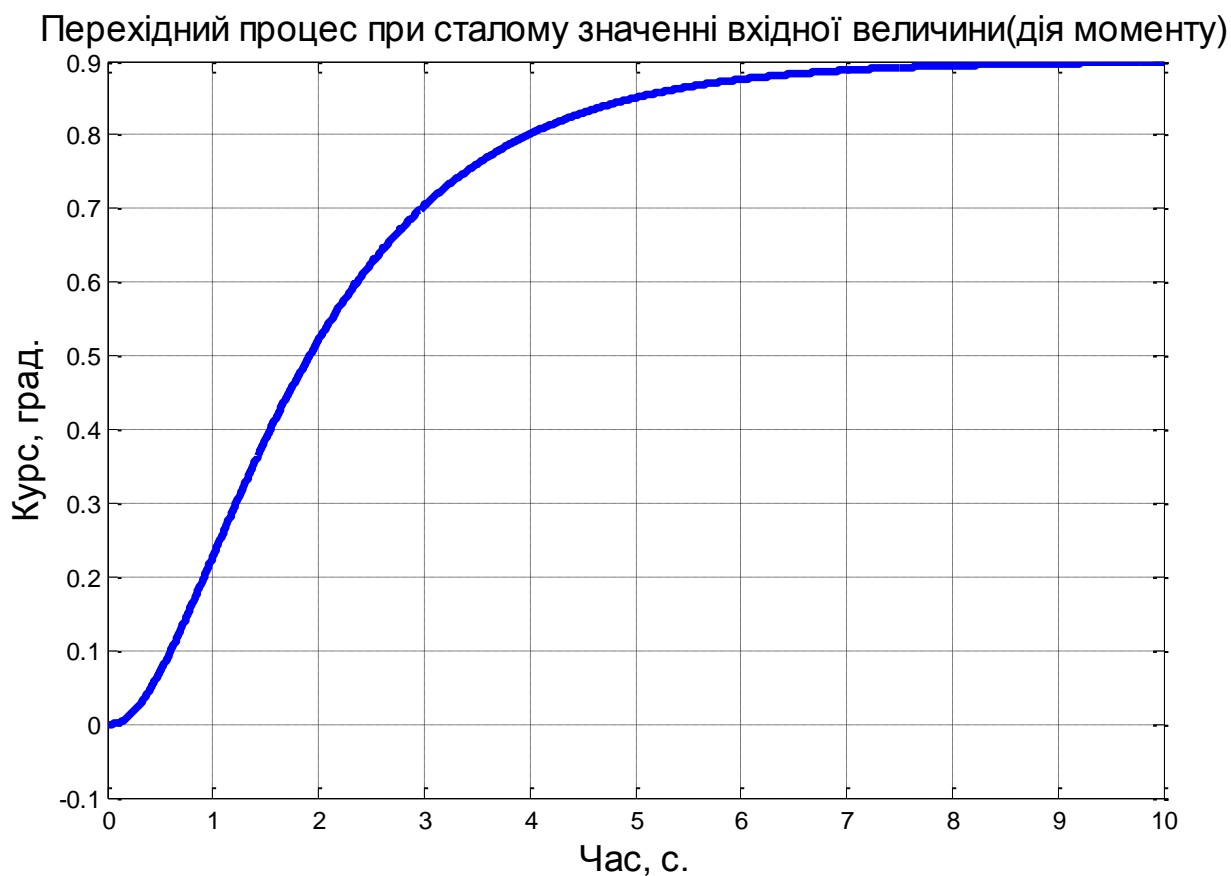


Рис. 3.3.4 – Графік перехідного процесу при сталому значенні вхідної величини при дії зовнішнього моменту

Як видно з рис. 3.3.4, вихідне значення сигналу встановилося у значенні  $0,9^\circ$ , при заданому значенні вхідного сигналу  $1^\circ$ , це викликано дією зовнішнього моменту, який порушує астатизм системи, тому на графіку проявляється статичність.

Задамо момент зовнішнього збурення в момент часу 5 с. На рис. 3.3.5 видно, що на протязі 5 с, система керування відпрацьовувала сигнал і виводила об'єкт керування на величину  $1^\circ$ , після прикладання моменту в момент часу 5 с, вихідне значення зменшилося до  $0,9^\circ$ . Це викликано статичністю системи до зовнішнього моменту. При проведенні реальних досліджень потрібно враховувати цю похибку та проводити подальше керування.

Перехідний процес при сталому значенні вхідної величини, при дії моменту

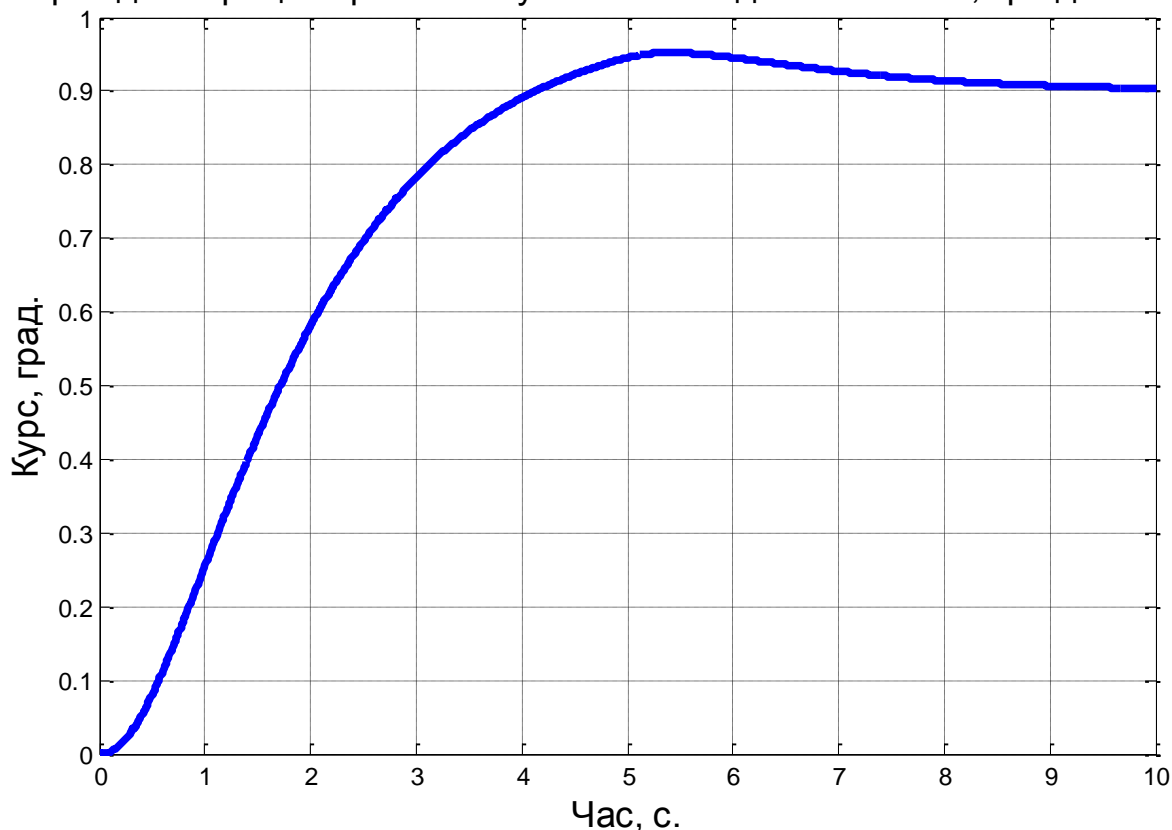


Рис. 3.4.5 – Графік перехідного процесу при сталому значенні вхідної величини, при дії моменту в час 5 с

Для більшої достовірності задамо на вхід системи одиничний стрибок в момент часу 3 с, при постійній дії зовнішнього моменту та подивимося як поводитиме себе система.

Дивлячись на рис. 3.3.6 – видно, що до моменту 3 с, тобто стану спокою, система при дії зовнішнього моменту відпрацьовувала лише похибку регулювання, після подання вхідного сигналу одиничним стрибком в момент часу 3 с, система почала виводити об'єкт керування на величину  $1^\circ$ , але через дію зовнішнього моменту усталене значення вихідного сигналу стало  $0,9^\circ$ .

Підводячи підсумок можна сказати, що дія зовнішнього моменту викликає похибку регулювання, при постійних вхідних сигнал (кута курсу). Ця похибка є постійною, так як по відношенню до зовнішнього моменту система є статичною. Тому надалі потрібно враховувати цю похибку, щоб використовували дану систему керування.

Перехідний процес при заданому одиничному стрибку, діє зовнішній момент

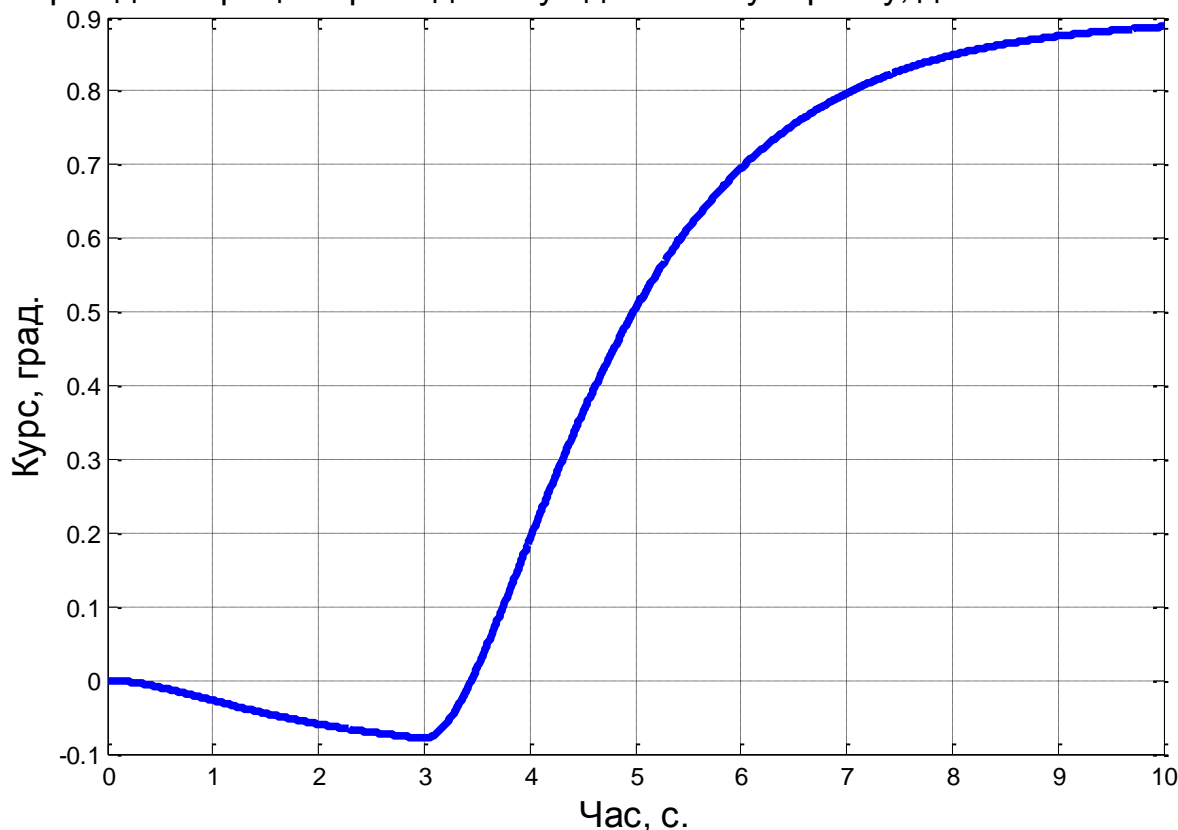


Рис. 3.4.6 – Графік перехідного процесу при заданому на вході одиничного стрибку, при дії зовнішнього моменту

### 3.4 Моделювання режиму при обході завади за траєкторією

Для того щоб змодельувати режим роботи обходу завади за траєкторією, потрібно задати траєкторію руху БПА, для прикладу візьмемо частину синусоїди. Задамо такі параметри траєкторії руху за синусоїдою частота коливань  $0,314$  рад/с та величину амплітуди  $5^\circ$ . Спочатку розглянемо роботу без дії зовнішнього моменту.

Для реалізації цього в Simulink потрібно в блоці Sine Wave задати вказані вище параметри та подати сигнал на вхід. Результати моделювання показані на рис. 3.4.1.

Як видно з графіків при задані траєкторії руху відрізком синусоїди система починає відпрацьовує вхідний сигнал, але на графіку бачимо запізнення вихідного сигналу, яке дорівнює  $0,22$  с, також присутнє зміщення по амплітуді на  $0,255^\circ$ .

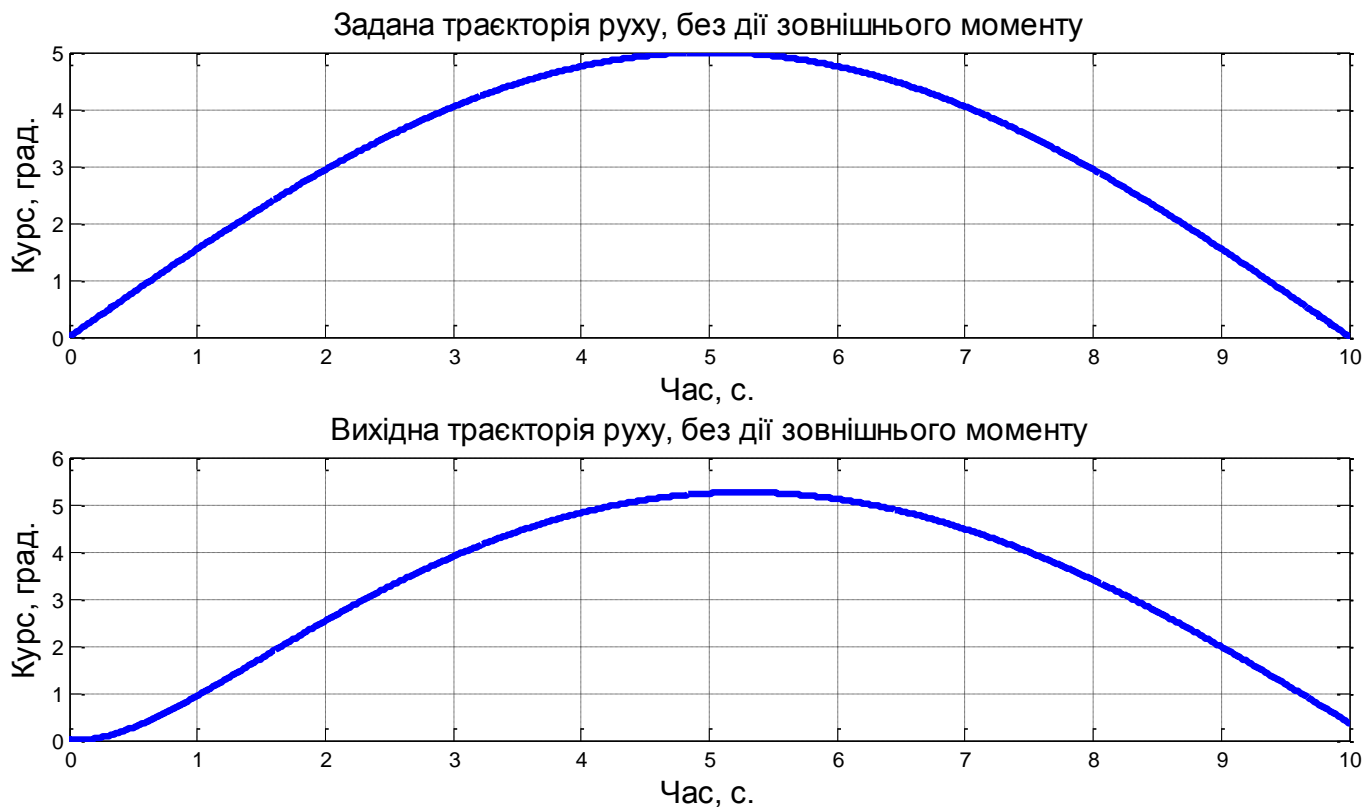


Рис. 3.4.1 – Графіки вхідної та вихідної траєкторії без дії зовнішнього моменту

Таке відхилення не є суттєвим при реальній роботі системи, але все ж його потрібно враховувати.

Тепер задамо рух за більшою траєкторією у часі та подивимося на результат. Параметри синусоїди частота  $0,0628$  рад/с, величина амплітуди  $5^\circ$ , а час моделювання збільшимо до 50 сек. Отримаємо результат на рис. 3.4.2.

Як видно з графіків рис. 3.4.2, розходження траєкторії з заданою незначне. Тому при задані траєкторії руху обходу заводи використовуючи частину синусоїди краще зменшувати частоту та збільшувати час обходу, тоді відхилення буде мінімальним.

Далі змодельємо режим роботи при дії зовнішнього моменту. Для тої ж самої траєкторії руху, що були до цього та отримає результати у вигляді графіків рис. 3.4.3 – рис. 3.4.4.



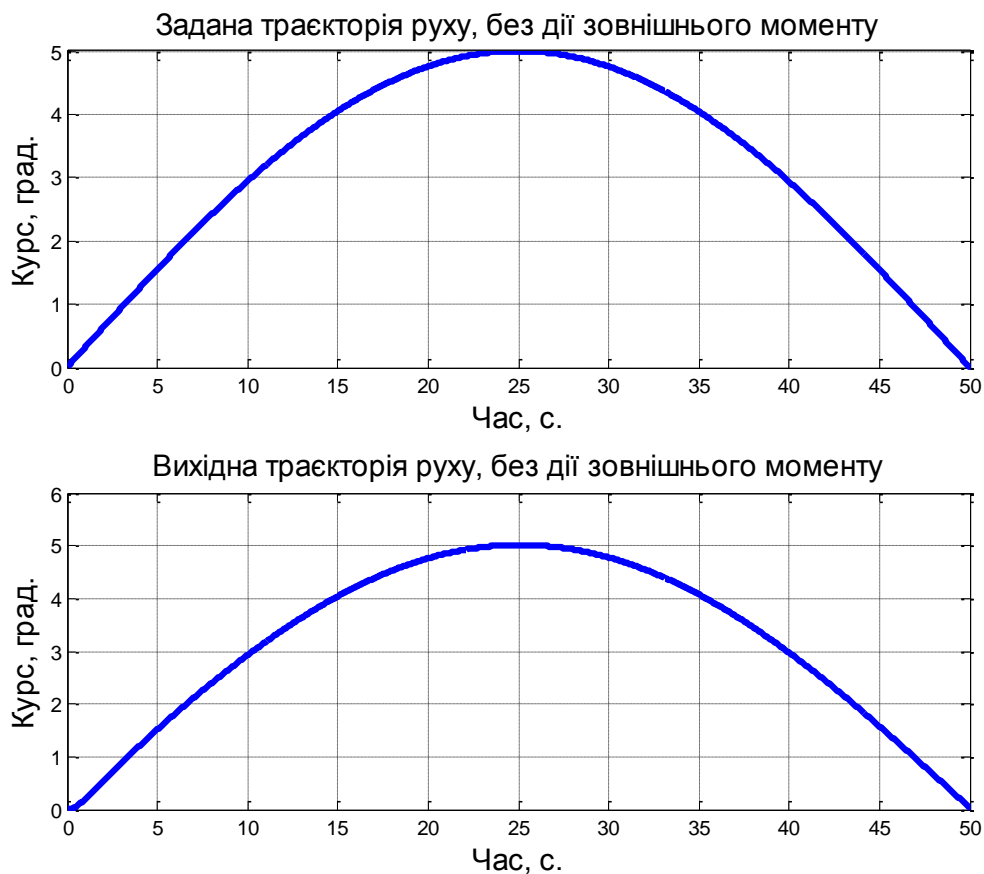


Рис. 3.4.2 – Графіки вхідної та вихідної траєкторії без дії зовнішнього моменту, при часі моделювання 50 с

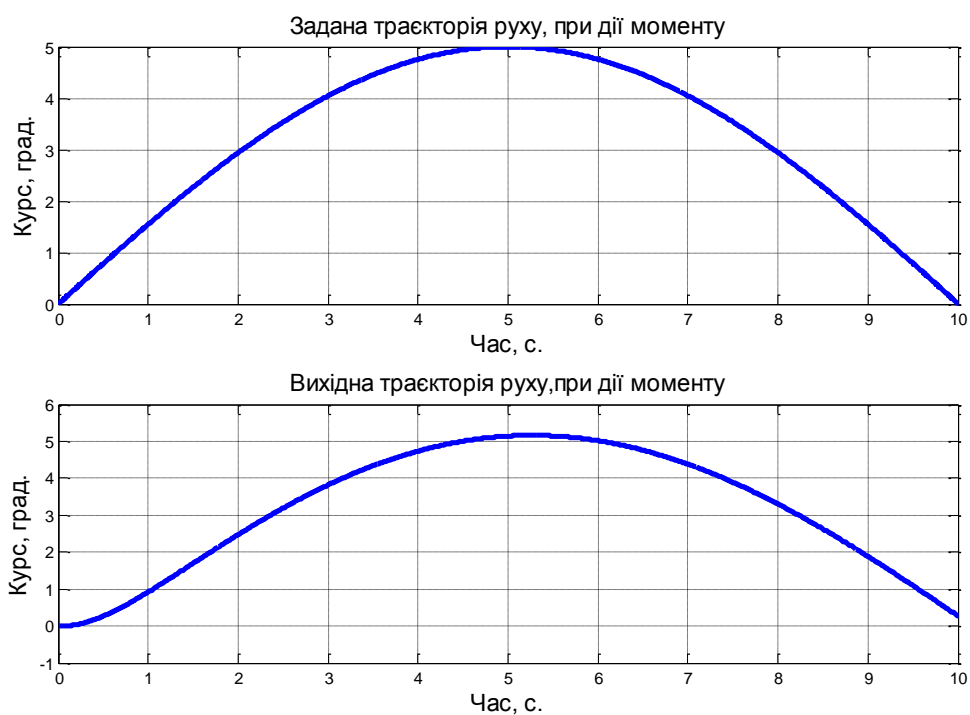


Рис. 3.4.3 - Графіки вхідної та вихідної траєкторії при дії зовнішнього моменту

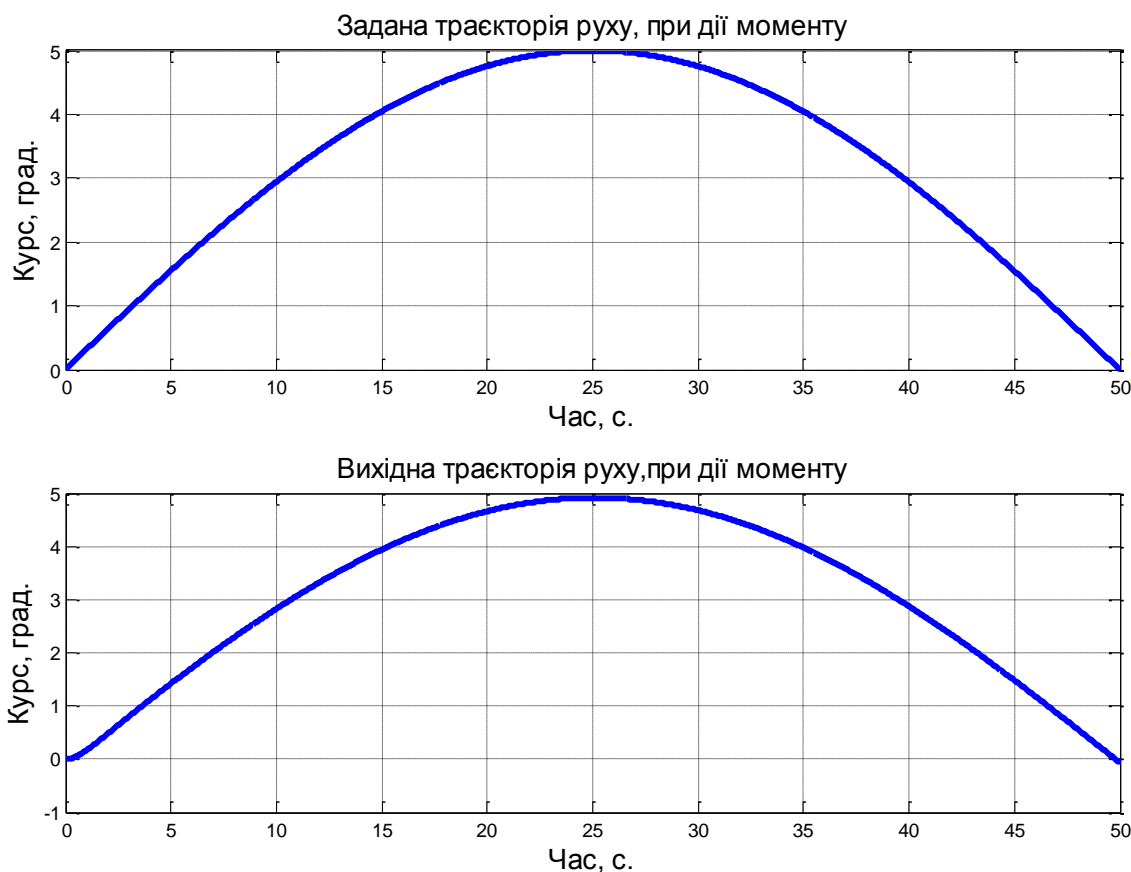


Рис. 3.4.4 - Графіки вхідної та вихідної траєкторії при дії зовнішнього моменту, при часі моделювання 50 с

При порівнянні графіків за час моделювання 10 с, амплітуда вихідного сигналу при дії зовнішнього моменту зменшилися на величину  $0,1^\circ$ , це викликано дією зовнішнього моменту, який створює похибку регулювання. Також запізнення після прикладання моменту зменшилося до 0,17 с.

Якщо порівнювати графіки при часі моделювання в 50 с, то відхилення від заданої траєкторії майже непомітно. Амплітуда в порівнянні з графіками без дії зовнішнього моменту зменшилася на  $0,1^\circ$ .

Отже, можна зробити висновок, що для кращої роботи системи у режимі обходу завади, краще задавати більшу траєкторію руху апарату, тоді відхилення від заданої траєкторії буде майже непомітним, також при дії зовнішнього моменту система проявляла статичність, це видно в сталості похибки регулювання. Надалі для більш високої точності, цю похибку треба враховувати.

### 3.5 Моделювання режиму маневрування за заданою траєкторією

Режим маневрування являє собою рух безпілотного підводного апарату за заданою довільною траєкторією. Такий режим роботи один з основних режимів роботи БПА при виконанні різного роду місій обстеження водного середовища.

Задамо траєкторію руху у вигляді синусоїди з частотою  $0,628$  рад/с та амплітудою  $5^\circ$ , для того щоб побачити, як система буде відпрацьовувати задану траєкторію руху. Результат показаний на рис. 3.5.1.

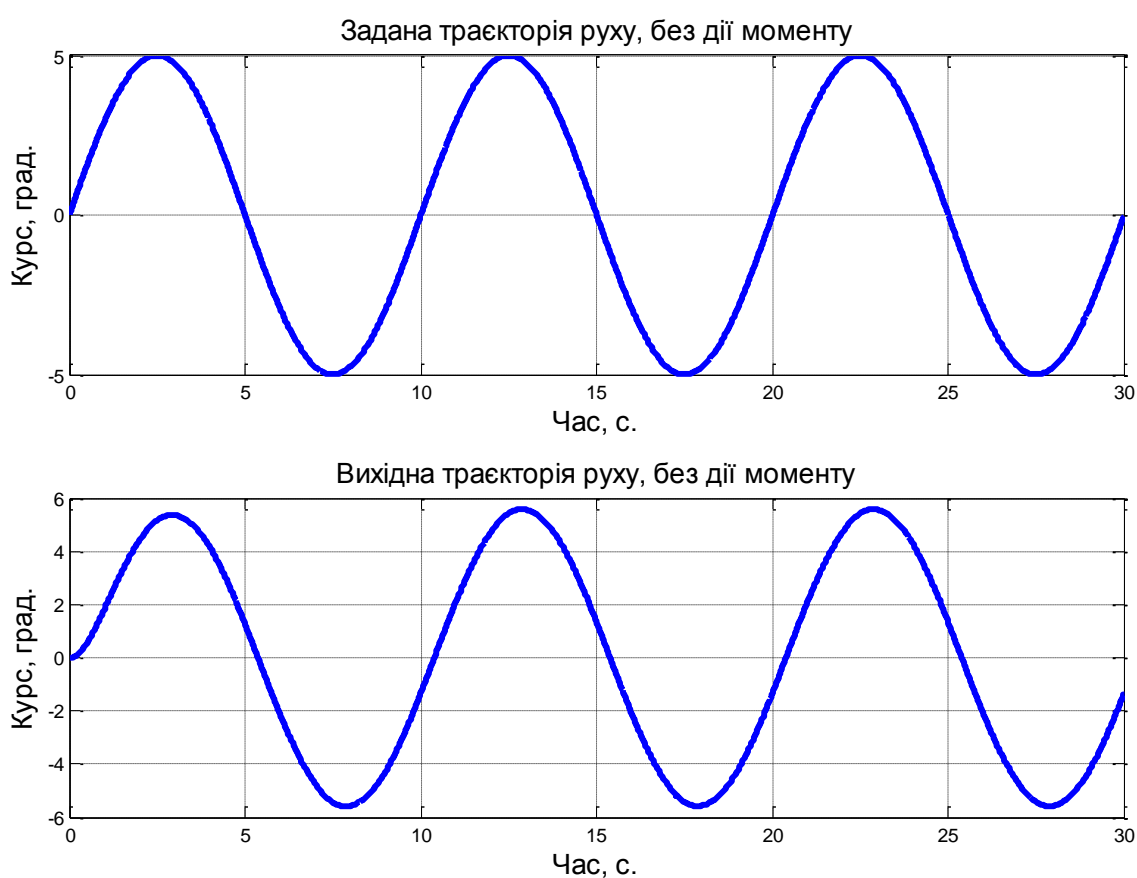


Рис. 3.5.1 – Графіки вхідної та вихідної траєкторії руху, без дії зовнішнього моменту, режим маневрування

Як видно з графіків, задаючи траєкторію руху у вигляді синусоїди система відпрацьовує вхідний сигнал та виводить об'єкт керування на вхідну траєкторію. Порівнюючи графіки вхідної та вихідної траєкторії бачимо запізнення обробки вхідного сигналу, це викликає запізнення вихідного сигналу у порівнянні з вхідним,

але це запізнення не є великим, приблизно 0,37 с, а відставання за амплітудою приблизно  $0,57^\circ$ .

Тепер розглянемо таку саму траєкторію руху, але вже при дії зовнішнього моменту. Результати показаний на рис. 3.5.2.

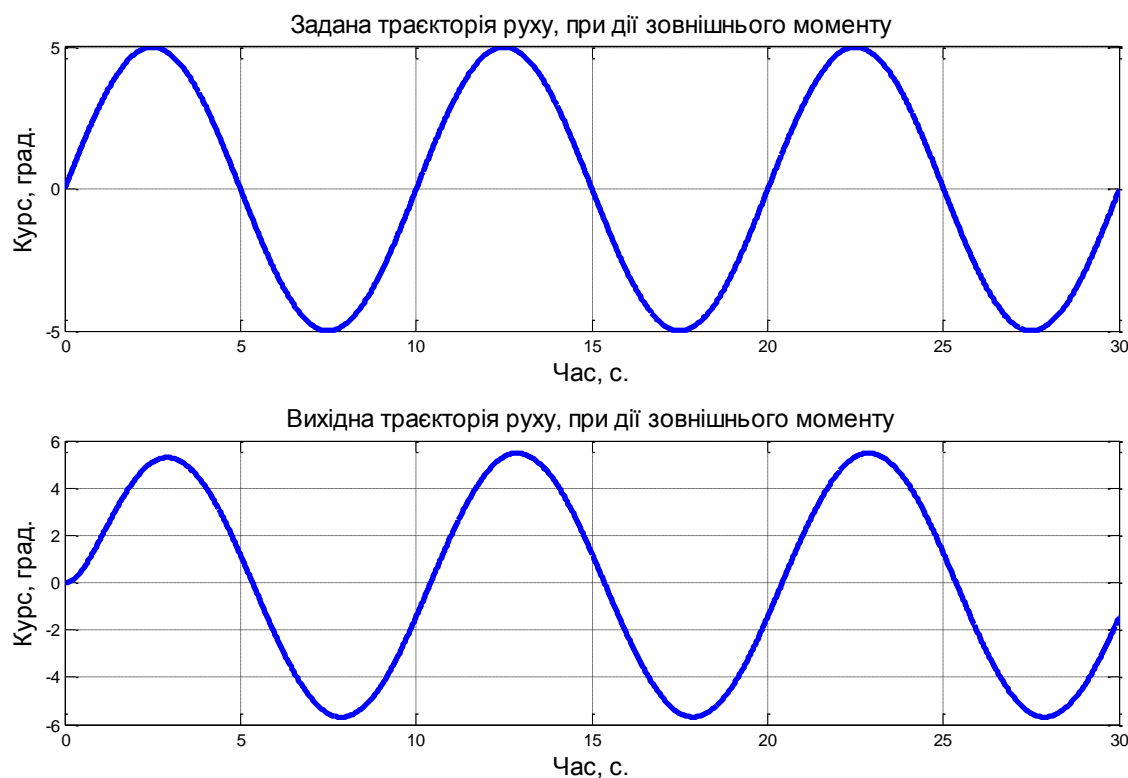


Рис. 3.5.2 - Графіки вхідної та вихідної траєкторії руху, при дії зовнішнього моменту, режим маневрування

Оцінюючи величину зміщення при дії зовнішнього моменту, можна сказати, що амплітуда вихідного сигналу зменшилася на  $0,1^\circ$ , а час запізнення зменшився на величину приблизно 0,15 с. Тобто можна сказати, що вплив зовнішнього моменту у режимі маневрування є константою, яку потрібно враховувати при реальній роботі безпілотного підводного апарату.

Отже, підводячи підсумок, у режимі маневрування система керування кутом курсу відпрацьовує вхідний сигнал з невеликим запізненням та виводить об'єкт керування на задану траєкторію.

### 3.6 Моделювання режиму роботи при рівномірній зміні кута курсу безпілотного підводного апарату

Для моделювання режиму роботи при рівномірній зміні кута курсу, скористаємося блоком Ramp в Simulink. Даний блок імітує рівномірну зміну кута курсу з заданою крутизною, задамо величину крутизни 0,1 та подамо на вхід системи цей сигнал, результати показані на рис. 3.6.1.

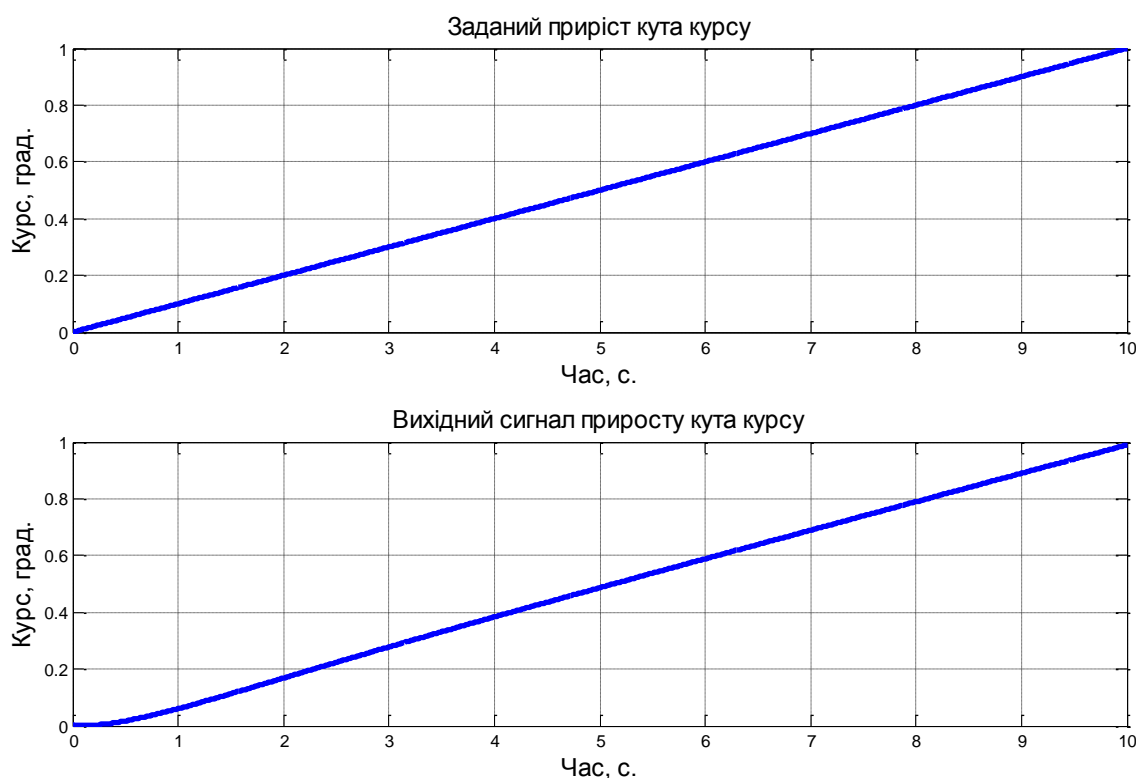


Рис. 3.6.1 – Графіки вхідного та вихідного значень приросту кута курсу

Як видно з графіків, після перехідного процесу система керування відпрацьовує вхідний сигнал приросту кута курсу, виникає невелике зміщення величини вихідного сигналу приросту, яке дорівнює приблизно  $0,01^\circ$ , це викликано запізненням опрацювання вхідного сигналу.

Тепер задамо, що рівномірна зміна курсу почалася у момент часу 2 с, для цього у блоці Ramp задамо початковий час 2 с. Отримаємо результати зображені на рис. 3.6.2.

Як бачимо з графіків, спочатку система знаходилася у спокою до моменту 2 с, після початку приросту спостерігаємо перехідний процес, після якого система

виходить на сталі значення вихідного сигналу кута курсу. Також спостерігаємо певне зміщення на величину  $0,01^\circ$ .

З цього можна зробити висновок, що система працює правильно, а зміщення виникає через невисоку швидкість відпрацювання.

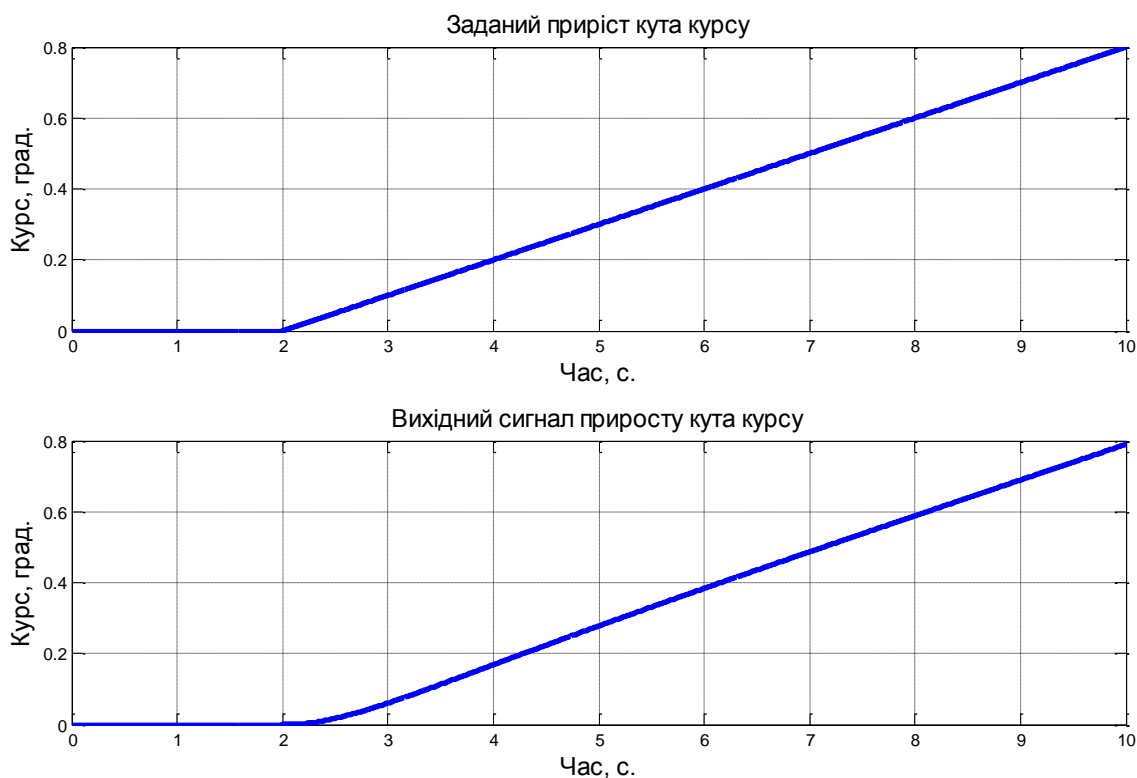


Рис. 3.6.2 - Графіки вхідного та вихідного значень приросту кута курсу, при часі початку приросту 2 с

Промодельюємо роботу системи з таким ж параметрами, але вже при дії зовнішнього моменту. Спочатку для першого випадку, коли приріст кута курсу починається в момент часу 0 с. Результати показані на рис. 3.6.3.

Отже, як видно з графіку вихідного сигналу, зміщення збільшилося на  $0,1^\circ$ , тобто загалом вихідний сигнал при прирості кута курсу зміщений на  $0,11^\circ$ . Похибку регулювання, від дії зовнішнього моменту потрібно враховувати при реальній роботі, тоді зміщення від заданого значення кута курсу буде мінімальним. Також видно, що при заданому режимі роботі не спостерігається накопичення похибки, а вона залишається константою.

Далі змодельюємо роботу коли приріст кута курсу починається у момент часу 2 с та при дії зовнішнього моменту. Результат показаний на рис. 3.6.4.

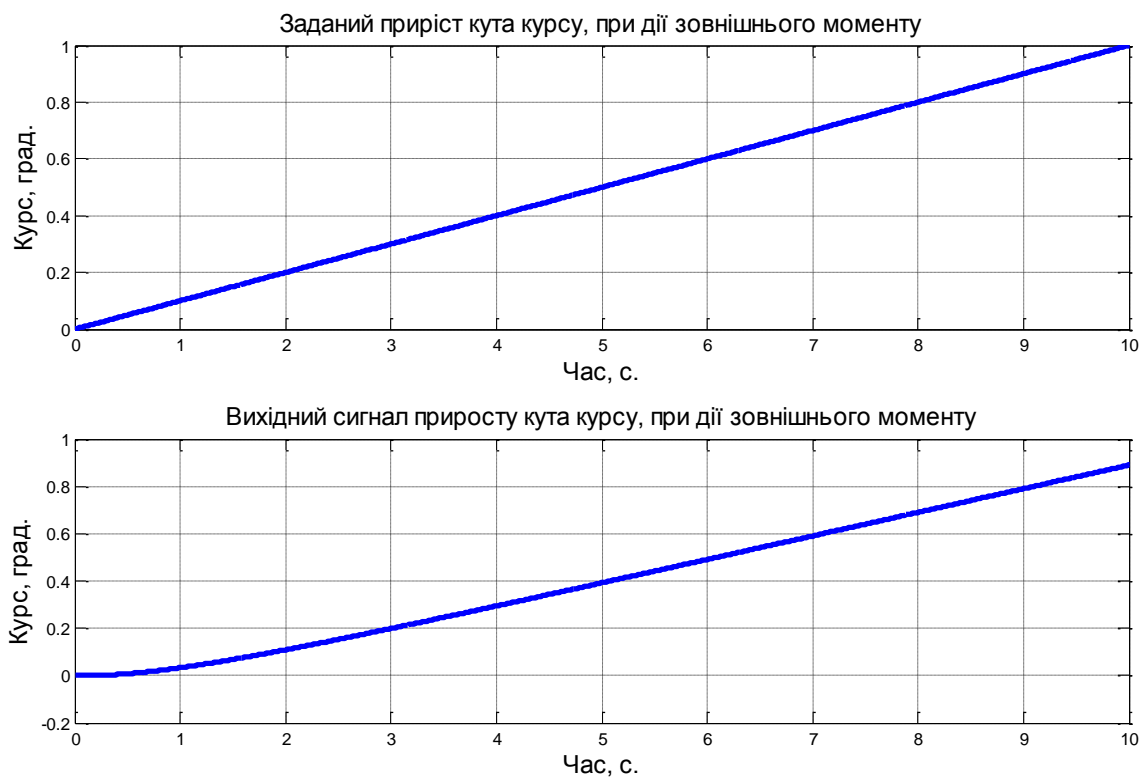


Рис. 3.6.3 - Графіки вхідного та вихідного значень приросту кута курсу, при дії зовнішнього моменту

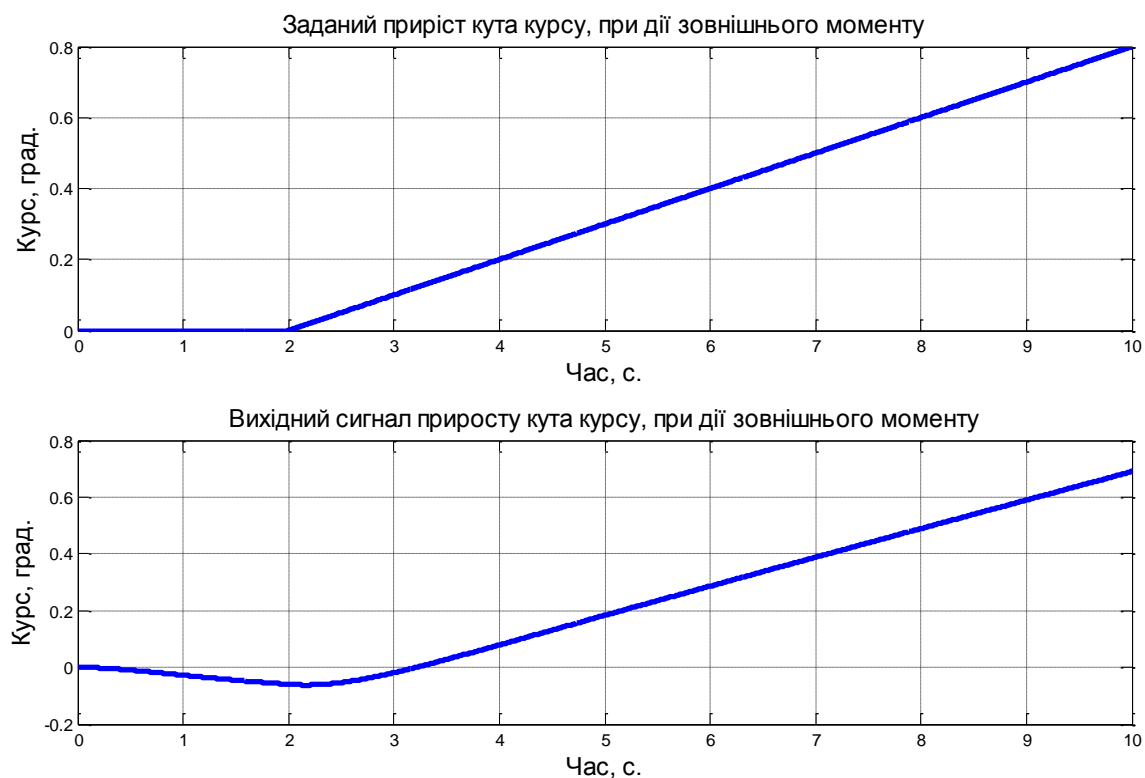


Рис. 3.6.4 - Графіки вхідного та вихідного значень приросту кута курсу у момент часу 2 с, при дії зовнішнього моменту

Аналізуючи графіки на рис. 3.6.4., бачимо, що до моменту часу 2 с, система показувала лише похибку регулювання величиною в  $0,1^\circ$ , після початку приросту в момент часу 2 с, система почала виводи об'єкт керування на вхідне значення кута курсу, але через похибку регулювання вихідне значення кута курсу зменшилося на  $0,11^\circ$ .

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено моделювання системи керування кутом курсу безпілотного підводного апарата. Для цих цілей було проведено вибір середовища моделювання. Вибір пав на середовище моделювання matlab, а саме розширення Simulink, адже він забезпечує, по суті, необмежені можливості застосування для вирішення практично будь-яких завдань імітаційного моделювання. Надалі в середовищі Simulink була складена структурна схема керування кутом курсу та наведено опис усіх блоків, які входять до неї.

Після складання структурної схеми було проведено моделювання різних режимів роботи системи керування. Перший режим роботи, був при постійному значенні кута курсу на вході системи. Були отримані графіки вихідного значення кута курсу при дії зовнішнього моменту та при його відсутності. При відсутності дії зовнішнього моменту, система відпрацьовувала сигнал на вході та встановлювала значення на виході, відповідно до входу. При дії зовнішнього моменту при нульовому значенні на вході виникала похибка регулювання. Це пов'язано з відсутністю астатизму системи по відношенню до зовнішнього моменту. Величина цієї похибки складає  $0,1^\circ$ . Вплив цієї похибки показаний при дії постійної величини при різному початковому часі.

Надалі було проведено моделювання режиму роботи при обході завади. Для цього в Simulink на вхід подавалася траєкторія руху обходу завади у вигляді частини синусоїди різної частоти та часу моделювання. Як показують результати, при відсутності дії зовнішнього моменту виникає невелике запізнення вихідного



сигналу, але вже при збільшенні траєкторії у часі, це запізнення майже непомітне. Дія зовнішнього моменту зміщую вихідне значення кута курсу по амплітуді на  $0.1^\circ$ .

Третім режимом роботи було маневрування за заданою траєкторією. Для цього в Simulink на вхід подавалася траєкторія руху у вигляді синусоїди невисокої частоти. Після моделювання, значення вихідного сигналу кута курсу було з невеликим зміщенням. При дії зовнішнього моменту вихідне значення змінилося на постійну величину похибки регулювання.

Останній режим роботи це робота при рівномірній зміні кута курсу. Для цього в Simulink на вхід подавалося постійна зміна значення кута курсу у часі. Для цього був використаний блок Ramp, який задане на вході системи постійну зміну вхідного значення у часі. Як видно з отриманих графіків виходу кута курсу, виникає запізнення в  $0,01^\circ$  по амплітуді, що є майже не суттєвим. При дії зовнішнього моменту ця похибка зростатиме до  $0,11^\circ$ .

Отже, підводячи підсумок можна сказати, що при роботі у всіх режимах присутня постійна похибка регулювання, яка виникає через дію зовнішнього моменту. Так як, система веде себе, як статична по відношенню до моменту, ця похибка буде не буде збільшуватися у часі, а буде постійним значення для всіх режимів роботи. Зменшити цю похибку можна, якщо збільшити коефіцієнт підсилення розімкнутої системи. Хоч похибка регулювання присутня у всіх режимах роботи, при реальному дослідженні її просто враховують та компенсують. Тому вплив цієї похибки на систему не є значним. Можна сказати, що використовувати розроблену систему керування кутом курсу доцільно використовувати на малогабаритних апаратах, з врахування вище вказаних пропозицій.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ»

#### 4.1 Опис ідеї проекту

Зміст ідеї полягає у синтезі системи керування безпілотним підводним апаратом, для покращення керованості підводного апарата та полегшення проведення досліджень водного середовища. Надалі проведено аналіз напрямків застосування, вигоди, які може отримати користувач за різними напрямками застосування табл. 4.1.1

Табл. 4.1.1 Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система керування безпілотним підводним апаратом	Військова промисловість	Збільшення керованості при виконанні розвідки підводного середовища.
	Приладобудування	Зменшення витрат на дослідницькі роботи, через використання моделі системи керування.
	Картографування	Збільшення режимів роботи для знімання рельєфу дна.

Висновок: Існує багато сфер використання де запропонована ідея є актуальною. Потенційного споживача можна знайти у військовій промисловості, приладобудівній сфері, а також у картографуванні. Використання запропонованої системи керування може бути і в мирних цілях, наприклад для малогабаритних підводних апаратів з камерою, яка виводить зображення на екран, наприклад для

знаходження місця розташування риби, затонулих об'єктів та інше. Існує багато вигідних умов для потенційних користувачів.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.1.2).

Табл. 4.1.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	СПБГЭТУ «ЛЭТИ»	Луч ДпДКБ			
1	Запас стійкості	59,9°	51,3°	49,6°			+
2	Похибка регулювання	10%	4%	7%	+		
3	Величина зміщення за амплітудою	0,1°	0,05°	0,08°		+	
4	Вартість досліджень	950 ум.од.	1250 ум.од.	1400 ум.од.			+
5	Час перехідного процесу	3,23 с	2,89 с	3,47с		+	

Висновки: Визначено двох потенційних конкурентів, наведених в табл. 4.1.2 і проведено аналіз слабких і сильних сторін у порівнянні з конкурентами. Як видно з таблиці проект має слабку сторону у величині похибки регулювання, нейтральні сторони зміщення за амплітудою та час перехідного процесу, проте має переваги у запасі стійкості та вартості дослідження.

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах технології проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Насамперед це буде передбачати аналіз таких складових:

- 1) Технологію за якою буде виготовлено товар.
- 2) Існування таких технологій.
- 3) Доступність цих технологій.

В табл. 4.2.1 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Табл. 4.2.1 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Синтез системи керування безпілотним підводним апаратом	Отримання динамічних рівнянь об'єкта керування	Наявні	Доступна
2.		Синтез структурної схеми керування об'єктом	Наявні	Доступна
3.		Моделювання системи керування за допомогою програми	Наявні	Доступна
4.		Перевірка системи при різних режимах роботи	Наявні	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Синтез системи керування безпілотним підводним апаратом в програмному середовищі.

Висновки: За табл. 4.2.1. обрана технологія синтезу системи керування саме в програмному середовищі, це є менш затратним ніж, синтез за допомогою реальних дослідів, а також можливість адаптувати систему керування під будь-який підводний апарат, з врахування його особливостей. Технології для реалізації системи керування доступні та наявні.

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту табл. 4.3.1, ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку табл. 4.3.1.

Таблиця 4.3.1 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція, та сертифікація у військовій сфері
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують якщо розглядати військову сферу,
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	35%

Висновки: Привабливість ринку для входження очевидна, через високу рентабельність та загальний обсяг продаж. Існують обмеження пов'язані з

військовою сферою, де потрібно виконання специфічних умов стандартизації та сертифікації. Оптимальна конкуренція у кількості п'яти головних гравців. Висока рентабельність у галузі.

Для отримання чіткішого представлення ситуації на ринку визначимо потенційні групи клієнтів (табл. 4.3.2), їхні характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи:

Табл. 4.3.2 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Синтез системи керування безпілотним підводним апаратом	Використання на військових апаратах, приладобудування, картографія.	Для військових апаратів керування системи. Для приладобудування зменшення затрат при розробці апарату. Для картографії, полегшення обстежень рельєфу дна	Керованість, точність, надійність, адаптивність, швидкість відпрацювання

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії військова, приладобудування, картографія та їх головні особливості, відмінності між вимогами до системи керування для різних груп аудиторії. Також визначено основні вимоги до системи керування(товару) це керованість, точність, надійність, адаптивність, швидкість відпрацювання.

Надалі складемо таблицю факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.3.3-4.3.4). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості.

Табл. 4.3.3 Фактори загроз

№п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Поява конкурентно-спроможних фірм	Покращення характеристик системи керування
2	Програмне забезпечення системи керування	Поява кращого програмного забезпечення для дослідження	Вдосконалення свого програмного забезпечення
3	Технології	Неможливість конструктивно внести зміни до апарату	Індивідуальне рішення для кожного з типів апарату
4	Якість	Невдоволення якістю системи керування	Покращення системи до рівня необхідного користувачу
5	Зміни у сертифікації	Зміна стандартів сертифікацій	Затрати для того, щоб сертифікувати продукт, для подальшого використання

Висновки: У таблиці 4.3.3 описані основні види загроз, одною із найбільш імовірною обрано зріст конкуренції, але завчасно покращивши характеристики системи керування даної загрози можливо уникнути. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, тому що їх наслідками може бути відмова використання синтезованої системи керування.

Поряд з загрозами існують і можливості, які наведені в табл. 4.3.4.

Табл. 4.3.4 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Збільшення фірм, які будуть використовувати саме нашу систему керування	Підвищення різноманітності системи для різних типів підводних апаратів
2	Необхідність модифікацій	Потреба в спеціальних можливостях системи	Розширення функціоналу системи, режимів роботи
3	Нові групи клієнтів	Поява нових покупців системи керування	Проаналізувати потреби нових покупців
4	Потреба	Підвищення	Покращення програмного

	збільшення стійкості	стійкості системи до зовнішніх збурень	забезпечення, врахування додаткових похибок
5	Дешевше використання програмного продукту	Зменшення витрат на програмне забезпечення для системи керування	Підтримання програмного продукту, для подальшого отримання знижки використання

Висновки: У табл. 4.3.4 приведені основні можливості, основна з яких це збільшення попиту, адже призведе до збільшення кількості користувачів системою керування, за рахунок цього виникають можливості описані у таблиці. Подальші фактори, можуть призвести до зниження ціни на програмне середовище для створення системи керування, а також покращення характеристик самої системи.

Далі проведемо аналіз пропозиції де визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.3.5).

Табл. 4.3.5 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку\*

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - чиста.	Достатньо невелика конкуренція.	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний.	Данна продукція користується попитом у всьому світі.	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева.	Продукт використовується в різних галузях, як мирних цілях, так і в військових.	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова.	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку



5. За характером конкурентних переваг - цінова.	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Пошук нових постачальників компонентів, які можуть запропонувати меншу ціну.
6. За інтенсивністю - немарочна.	Конкретного бренду немає, але значення має яка країна та яке підприємство виготовляє продукт	Залежить від якості продукту.

\*Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу на міжнародний ринок, використання товару можливі у різноманітних сферах, а довіра до товару будується за рахунок якості продукту, адже підприємств які можуть виготовляти даний товар не так і багато.

Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 4.3.6).

Таблиця 4.3.6 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«ЛЕСИ» «Луч»	«Радар» «Арсенал»	«ЛЕСИ»	Військова промисловість; Приладобудування	Синтез іншої системи керування
Висновки	Конкуренція є, але не досить значна	Є можливість виходу на ринок. Існування	Постачальник не диктує умови роботи на ринку, адже	Клієнти можуть диктувати свої умови	Обмеження не буде, через те, що інша синтезована

		потенційних конкурентів	програмний середовище доступну для всіх	тільки при необхідності сертифікації системи	система, може бути не адаптивною і не стійкою
--	--	-------------------------	---	--	---

Висновки: Проаналізувавши, можна сказати з оглядом на конкуренцію, на ринку можна працювати. Конкуренція не велика. Постачальник не може диктувати умови на ринку, адже вони для всіх будуть однакові, і можуть бути змінені тільки, як виключення. Можливі специфічні умову, в деяких галузях. Замінники, не зможуть в повній мірі задовольнити потреби, які необхідні від системи. Замінники не зможуть повністю відтворити усі показники системи керування. Для сертифікації, система має мати сильні сторони, а саме: надійність, стійкість, адаптивність режимів роботи, а також врахування особливостей для кожного типу підводного апарату.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл. 4.3.6, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту табл. 4.1.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.3.2) та факторів маркетингового середовища табл. 4.3.3-4.3.4) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності табл. 4.3.7.

Таблиця 4.3.7 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Стійкість	Забезпечення стійкості системи з великим запасом
2	Адаптивність	Використання системи за різних режимів роботи
3	Програмне забезпечення	Доступність програмного забезпечення, без додаткових витрат
4	Надійність	Робота системи керування при різних зовнішніх факторах
5	Сертифікованість	При потребі користувачів, отримання сертифікатів, через відповідність стандартам

Висновки: Як видно з таблиці наведеної вище, основні фактори конкурентоспроможності стійкість, адаптивність, програмне забезпечення, надійність та сертифікованість, також присутні обґрунтування, які визначають сильні сторони системи керування, а також користь для потенційного користувача.

За визначеними факторами конкурентоспроможності табл. 4.3.8) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту табл. 4.3.9

Табл. 4.3.9 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з підприємством «ЛЄТИ»							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
1	Стійкість	15	+							
2	Адаптивність	18			+					
3	Програмне забезпечення	16				+				
4	Надійність	19						+		
5.	Сертифікованість	17				+				

Висновки: Отже, порівнюючи систему з конкурентною були визначені такі сильні сторони: стійкість, адаптивність та програмному забезпеченні. Слабкою стороною являється надійність та сертифікованість. Очевидно, що система конкурентоспроможна існуючим аналогам. Основні переваги у стійкості та адаптивності системи до різних зовнішніх факторів та особливостей підводного апарату.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу табл. 4.3.10.

Табл. 4.3.10 SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока адаптивність системи до зовнішніх факторів</li> <li>2. Висока стійкість системи</li> <li>3. Система відповідає стандартам, для подальшого проходження сертифікації</li> <li>4. Застосування у різних сферах, такі як військова, приладобудівна, картографія.</li> <li>5. Простота використання програмного забезпечення</li> </ol>	<p>Слабкі сторони</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можлива нижча надійність системи, через відсутність реальних досліджень.</li> <li>2. Більша похибка регулювання системи.</li> </ol>
--	---

<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення користувачів системою</li> <li>2. Покращення характеристик системи.</li> <li>3. Зменшення витрат на програмний продукт.</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можлива незадовільність похибкою регулювання, у порівнянні з конкурентами.</li> <li>2. Відмова користування, через неперевіреність надійності системи.</li> </ol>
--	---

Висновки: Провівши SWOT-аналіз, визначені можливі загрози та можливості, вони передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози присутні, це викликано тим, що система досить нова і не перевірена на надійність при реальних експериментах, але більша увага була приділена адаптивності та стійкості системи.

Далі за SWOT-аналізом розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначимо оптимальні строки реалізації табл. 4.3.11.

Табл. 4.3.11 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Покращення програмної реалізації системи	Висока	1 міс.
2	Отримання експериментальних досліджень системи	Середня	6 міс.

Висновки: Провівши аналіз обираємо альтернативу – покращення програмної реалізації системи, через високу ймовірність отримання ресурсів, а також малий строк реалізації. Друга альтернатива програє у ймовірності отримання ресурсів, а також часу реалізації

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів табл. 4.4.1.

Табл. 4.4.1 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Військова сфера	Середня	Високий	Середня інтенсивність	Середня складність
2.	Приладобудування	Середня	Середній	Інтенсивна	Низька складність
3.	Картографія	Висока	Високий	Не інтенсивна	Середня складність
Які цільові групи обрано: Військова промисловість, картографія.					

Висновки: Провівши опис цільових груп потенційних клієнтів, а також готовність споживачів прийняти продукт, простоту входу та інтенсивність. Цільові групи, які були обрані це військова промисловість, та картографія через високий попит та відносно невелику конкуренцію у сегменті, а також середню простоту входу у сегмент. Обирається стратегія диференційованого маркетингу, через те, що проводиться робота у декількох сферах.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку табл. 4.4.2.

Табл. 4.4.2 Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана	Стратегія	Ключові	Базова стратегія
---	--------	-----------	---------	------------------

п/п	альтернатива розвитку проекту	охоплення ринку	конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	розвитку
1.	Покращення програмної реалізації системи	Стратегія диференційованого маркетингу.	- Використання нового забезпечення - Відповідати потребам користувачів	Стратегія диференціації

Висновки: Базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, вона передбачає надання відмінних властивостей товару, за вимогою користувача, це робить товар особливим, на відміну від товару конкурентів, за певними властивостями. Більшу увагу буде приділено стійкості та адаптивності системи, а менше до регулювання.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки табл. 4.4.3.

Табл. 4.4.3 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Проект не є першопрохідцем	Так, будуть шукатись нові споживачі, а також забирати існуючих у	Копіювання не буде. Продукт може мати схожі методи синтезу, але більш	Стратегія виклику лідера.

		конкурентів	вдосконалені	
--	--	-------------	--------------	--

Висновки: Як видно з таблиці вище, обрана стратегія конкурентної поведінки – це стратегія виклику лідера. Вона полягає у протистоянні лідеру, через кращий продукт, який може зайняти найвищу позицію на ринку, через кращі характеристики, а також стати найбільш привабливим для клієнта. Проект не являється першопрохідцем, а також характеристики системи не будуть копіюватися, тільки вдосконалюватися.

На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування табл. 4.4.3.

Табл. 4.4.3 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Стійкість	Стратегія диференціації	Стійкість до зовнішніх факторів	Стійка, високий запас, адаптивність
2	Програмне забезпечення	Стратегія диференціації	Застосування найкращого програмного забезпечення	Легкість використання, інтерфейс роботи, доступність.
3	Ціна	Стратегія диференціації	Доступна цінова політика	Гнучкість, якість, гарантія

Висновки: Позиція власного проекту, три ключових слова: стійка, адаптивна, якісна. Зроблено це було на основі головних вимог аудиторії до системи керування, ними було обрано: стійкість, програмне забезпечення, ціна. Базова стратегія, яку було обрано це стратегія диференціації.

## 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач табл. 4.5.1.

Табл. 4.5.1 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Збільшення стійкості системи, адаптивності системи до зовнішніх умов, можливість переключатися між режимами роботи	Система керування має високі показники стійкості, різні режими роботи, а також відносно невелику ціну при використанні	Адаптивність, різноманітність режимів роботи, стабільність програмного забезпечення, цінова політика.

Висновки: З табл. 4.5.1 видно, що є багато переваг для споживача, а саме у стійкості, адаптивності, режимах роботи та адаптивного програмного забезпечення, відносно систем конкурентів. Системи конкурентів, не можуть запропонувати деякі з характеристик системи потенційному клієнту.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару табл. 4.5.2.

Табл. 4.5.2 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість керування безпілотного підводного апарату. Вигідним є адаптивність до зовнішніх умов, а також різноманітність режимів роботи, а також вдосконалення характеристик		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Запас стійкості	1. 59,9°	1. Тх
	2. Зміщення амплітуди	2. 0,1°	2. Тх
	3. Час перехідного процесу	3. 3,23 с	3. Тх



	4. Ціна	4. 950 ум.од.	4. Е
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO		
	Марка: проект «Система керування безпілотним підводним апаратом»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Вибір режимів роботи системи при дослідженні водного середовища		
	Після продажу: програмне обслуговування, інформаційна підтримка.		
Продукт буде захищено, за допомогою патентування, а також введенням комерційної таємниці на розрахунки та програмну модель.			

Висновки: За результатами таблиці вище, отримали опис трьох рівнів моделі, за ними можна зрозуміти призначення товару, а також проблеми які він вирішує, наведені його основні характеристики, та техніко-економічні властивості. Товар буду захищено за допомогою патентування, а також комерційної таємниці.

Надалі проведемо визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар табл. 4.5.3.

Табл. 4.5.3 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	900-2000 ум. од.	650 – 3000 ум.од.	11000-19000 ум.од.	Нижня межа: 950 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од.

Висновки: Як видно з таблиці вище, встановлена ціна на товар від 950-3500 ум.од. Така ціна відповідає характеристикам товару, яка запропоновано користувачу і відносно нижча від товару конкурентів. Цін базувалася на затрати синтезу системи керування, програмного забезпечення, а також базуванні її на підводному апараті. Також, показаний рівень доходів цільової групи, але основним споживачем все ж є компанії.

Надалі виконаємо визначення оптимальної системи збуту, в межах якої приймається рішення табл. 4.5.4.

Табл. 4.5.4 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення заздалегідь, з підписанням контракту	Встановлення програмного забезпечення та перевірка реальної роботи	Прямий	Пряма

Висновок: Як видно з таблиці вище, найкраще використовувати прямий канал збуту, через компанії. Це дасть змогу контролю ціни у порівнянні з конкурентами, а також використовуючи прямий канал збуту допоможе зосередити дохід в одних руках.

Надалі проведемо розроблення концепції маркетингових комунікацій табл. 4.5.5.

Табл. 4.5.5 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Отримання товару, який би відповідав специфічним умовам роботи	Мобільний зв'язок, інтернет.	Стійка, адаптивна система	Розповсюдження інформації про товар, з ціллю приваблення нових клієнтів потенційних клієнтів	Основне, це повідомлення про більш стійку та адаптивну систему для різних режимів роботи

Висновки: Концепція маркетингової комунікації спрямована на приваблення нових клієнтів, за допомогою мобільного зв'язку та інтернету, адже вони являються основними каналами комунікації, досягається це шляхом повідомлення, про систему, яка більш стійка та адаптивна для різних режимів роботи

#### **Висновки до розділу 4**

Розробляючи стартап-проект було виконано етапи, які необхідні для аналізу ринку, конкурентоспроможності, вибір чітких стратегій для того, щоб впровадити стартап-проект на ринок, проведена оцінка ризиків та можливостей, все це виконано для того щоб проект став успішним.

При визначенні основних напрямків застосування, було виявлено, той факт, що товар має досить великий попит у різних сферах, такі сфери: військова сфера, приладобудування та картографія. Це забезпечується кращими характеристиками товару по відношенню до конкурентів.

Провівши аналіз ринкових можливостей запуску, було виявлено те, що ринок є привабливим для входу, причому середній рівень рентабельності у галузі є досить високим. Було визначено основний ризик це конкуренція, можлива реакція компанії покращення характеристик системи. Основна можливість була обрана, як зростання попиту, що призведе до збільшення клієнтів, а для підтримання цього, можлива реакція компанії, збільшення режимів роботи. Аналізуючи риси конкуренції на ринку, можна сказати, що конкуренція не є великою, існують виходи на міжнародний ринок, використання товару повністю можливе у різних сферах. При подальшому аналізі бачимо, що для окремих потенційних клієнтів є специфічні умову, також очевидно те, що товари-замінники не зможуть повністю задовольнити потреби клієнтів. Проведено аналіз сильних та слабких сторін, до сильних сторін відносяться стійкість, адаптивність та програмне забезпечення, слабкі сторони – надійність та сертифікованість.

Надалі була розроблена ринкова стратегія проекту, цільові групи, які було обрано – військова сфера, приладобудування, картографія, також було обрано

базову стратегію розвитку – диференціацію. Стратегія конкурентної поведінки – стратегія лідера. Три ключові слова, які формулюють позицію проекту: стійка, адаптивна, якісна.

Далі після розроблення маркетингової програми стартап-проекту, було встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють 950-3500 ум.од. Така ціна є досить привабливою для клієнтів, а також знаходиться на рівні товарів конкурентів.

Розроблений проект доцільний для використання

## ВИСНОВКИ

1. В результаті огляду стану проблеми було наведено основні види безпілотних підводних апаратів, їх класифікація, функціональні можливості, режими роботи. Серед усіх БПА можна виділити два великі класи це телекеровані безпілотні підводні апарати та автономні БПА. Більшої актуальності на сьогодні мають автономні апарати, так як сфера їх використання є куди більшої ніж в телекерованих апаратів. При огляді виконаних раніше робіт були виявлені проблеми створення системи керування безпілотних підводних апаратів, більшість труднощів з синтезуванням високоякісної системи керування полягає в неможливості визначення параметрів самої АБПА.

2. Аналізуючи особливості безпілотного підводного апарату, як об'єкта керування було виявлено його основні проблеми. БПА є складними багатовимірними нелінійними динамічними об'єктами, що функціонують в умовах наявності перехресних зв'язків між їхніми ступенями свободи, зовнішніх збурень, а також змінності і невизначеності їх параметрів. Все це дуже ускладнює дослідження, при використанні повної математичної моделі. Вивчивши підходи до синтезу системи керування безпілотним підводним апаратом, було обрано першу групу систем керування, яка базується на спрощених математичних моделях БПА, чи при прийнятті факту сталості окремих параметрів БПА. Це дозволило надалі, скласти спрощену математичну модель безпілотного підводного апарату, а також синтезувати структуру схему керування кутом курсу безпілотного підводного апарату. В якій БПА розглядається, як об'єкт керування у вигляді рівняння динаміки. Для того щоб дослідити обрану структурну схему, потрібно було знайти передатні функції окремих елементів системи, а надалі передатну функцію розімкненої та замкненої системи, що і було зроблено. По ним було зроблено висновки про стійкість системи керування.

3. Після теоретичного аналізу системи керування було проведено моделювання системи керування. Для цих цілей було обрано середовище Simulink, після створення системи керування в середовищі Simulink було модельовано 4

режими роботи системи керування. А саме режим роботи при сталому значенні кута курсу на вході системи, режим роботи при обході завади, режим маневрування та режим роботи при рівномірній зміні кута курсу системи. Аналізуючи усі ці режими роботи, було встановлено постійно похибку регулювання, яка виникає через дію зовнішнього моменту. Наведено методи її зменшення, а також вказано, що дана похибка являється константою, при усіх режимах роботи, тому при реальних дослідження її потрібно враховувати, що підвищить точні системи керування.

4. Далі було проведено розробку стартап-проекту за темою дисертації. Для цих цілей було проаналізовану технологічний аудит ідеї проекту, ринкові можливості запуску стартап-проекту, ринкова стратегія проекту, а також розроблена маркетингова програма проекту. Після виконання усіх розрахунків, аналізу можливих сфер використання, конкуренції і так далі, можна сказати, що розроблений стартап-проект доцільний для використання.

Отже, підводячи підсумок всієї роботи, можна прийти до висновку, що синтезована система керування кутом курсу безпілотного підводного апарату, може використовуватися на малогабаритних безпілотних підводних апаратів. З врахування усіх зауважень, які були наведені в роботі. Надалі за даними цієї дисертації можна перейти до створення більш повної моделі БПА. Наприклад, створити систему керування за всіма кутами орієнтації БПА, а саме креном, диферентом та курсом. Або використати повні математичні моделі БПА та по ним створити систему керування, але це дуже громіздка робота, яка потребуватиме великої кількості часу.

### Список використаної літератури

1. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 424 с. — ISBN 5-9221-0735-6.
2. Обитаемые подводные аппараты <http://www.ocean.ru/content/view/133/82/>
3. Войтов Д. В. Подводные обитаемые аппараты / Д. В. Войтов. — М. : ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2002. — 303 с.
4. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Микроробототехника - Электроника. Наука, технология, бизнес. - 2009. - №7. - с.62-93.
5. Исследование прикладных вопросов обеспечения контроля состояния морской среды Балтийского моря в зоне прокладки СЕГ. - СПб.: ЗАО "АПМП", 2006. - 234 с.
6. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные роботы и робототехника. - 2006. - №1. - с.6-17.
7. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого аппарата в целях обследования акватории // Подводные роботы и робототехника. - 2010. - №10. - с.17-24.
8. Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В.. Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред. //Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. – М: Изд-во «Радиотехника», № 1-3, т.4, 2006. с.73-79
9. Пшихопов В.Х. Аналитический синтез синергетических регуляторов для позиционно-траекторных систем управления мобильными роботами. //Сборник 128 трудов научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» Под научной ред. проф. Е.И. Юревича. Центральный

научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики. г. Санкт-Петербург, 2001, с.59-68.

10. Пшихопов В.Х. Устройство позиционно-траекторного управления мобильным роботом. Патент РФ № 2185279, бюл. № 20, 2002 г.
11. Г.Ю. Илларионов, В.В. Сидоренко, С.В. Смирнов Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин, институт проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток – 2006, с. 31-39
12. Электронный ресурс Tetris Pro URL: <http://www.tetis-pro.ru/faq/8028/>
13. Электронный ресурс техника для спецслужб Бюро научно-технической информации URL: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=3364&tbl=09.02.>
14. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука. – 2005. – 398 с
15. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. –2004. – № 5. – С. 23-28.
16. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2. – С. 5-14.
17. Юхимец Д.А. Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов. Дисертация на соискание ученой степени доктора технических наук.- Владивосток: ИАПУ., 2014.-315 с.
18. Супер Гном Про телеуправляемый подводный аппарат. Режим доступа: <http://www.gnomrov.ru/products/super-gnom-pro/> (Дата обращения 27.11.16)
19. Агеев М.Д. Автоматические подводные аппараты/ М.Д. Агеев, Б.А Касаткин., И. В. Киселев и др. - Л.: Судостроение, 1981., -224 с.: ил.
20. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С., Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник - Л.: Судостроение, 1988.-272 с., ил.



21. Блінцов С. В. Онлайн-ідентифікація параметрів підводного апарата як нестационарного об'єкта в системі керування на базі інверсної моделі [Електронний ресурс] // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». - Миколаїв : НУК, 2012. - № 3. - Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>(Дата обращения 05.11.16)
22. Antonelly G. Underwater Robots. - Springer-Verlag, 2012.- 265 p.
23. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. - John Willei and Sons, 2004.-494 p.
24. Макарычев В.П. Разработка и исследование системы упервизорного управления космическим манипуляторами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук,- СПб: ЦНИИ РТК, 2011. - 203 с.
25. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки, Л.: Судостроение, 2-х томах, 1987.-387с.
26. Ю.Шостак В.П. Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы. - Чикаго, Мегатрон, 2011, 134с.
27. Jeff Kennedy Decoupled Modelling and Controller Design for the Hybrid Autonomous Underwater Vehicle: MACO / Kennedy Jeff - B. Eng., University of Victoria, 2012
28. Louis Andrew Gonzalez DESIGN. MODELLING AND CONTROL OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE / Gonzalez Louis Andrew - The University of Western Australia, Pert.-2010.- 134 с.
29. Громыко В.Д., Санковский Е. А. Самонастраивающиеся системы с моделью. - М.: Энергия, 1974. - 80 с.
30. Козлов В.И. Самонастраивающиеся системы с релейными элементами. - М.: Энергия, 1974. - 88 с.
31. Агеев М.Д. Автономные необитаемые подводные аппараты. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.
32. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами. – М.: Круглый год, 2001. – 288 с.

33. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Синтез и исследование самонастраивающейся системы управления движителями подводного аппарата // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2000. – № 4. – С. 60-64.
34. Antonelly G. Underwater Robots. – Springer-Verlag, 2006.
35. Патент РФ №2147985. Устройство для управления движителем подводного робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, Д.А.Юхимец. БИ №12. 2000.
36. Ястребов В.С., Игнатъев М.Б., Кулаков Ф.М. и др. Подводные роботы. – Л.:Судостроение, 1977. – 367 с.
37. Tang S., Ura T., Nakatani T., Thornton B., Jiang T. Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND // Journal of Marine Science and Technology. – 2009. – No.14. –P.373-386.
38. Юхимцев Д.А. Методі формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2014.
39. Трупов А.Н. Математическая модель подводного аппарата с учетом динамических свойств управляющих систем // Проектирование подводных аппаратов. Сборник научных трудов. – 1990. – С.35-40.
40. Агеев М.Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА. Подводные роботы и их системы / Отв. ред. Л.В. Киселев. Под общ. ред. М.Д.Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – С.33-49.
41. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высшая школа, 1980. – 287 с.
42. Соколов Н. И., Рутковский В. Ю., Судзиловский Н. В. Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами. – М.:Машиностроение, 1988. – 208 с.
43. Фомин В.Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. - М.: Наука, 1981, 447 с.

44. Cao J., Su Y., Zhao J. Design of an Adaptive Controller for Dive-plane Control of a Torpedo-shaped AUV // *Journal of Marine Science and Applications*. – 2011 – Vol. 33. – P. 333-339.
45. Громько В.Д., Санковский Е. А. Самонастраивающиеся системы с моделью. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.
46. Козлов В.И. Самонастраивающиеся системы с релейными элементами. – М.: Энергия, 1974. – 88 с.
47. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 260 с.
48. Дыда А.А., Лебедев А.В. Нелинейная адаптивная коррекция движителя подводного робота // *Известия ВУЗов. Электромеханика*. – 1996. – №1-2. – С. 83-87.
49. Крутько П.Д. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными системами манипуляторов // *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1988. – №4. – С. 3-13.
50. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. - Нижний Новгород: НГУ, 2006. – 93 с.
51. Методы робастного, нейро - нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд - во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
52. Дыда А.А., Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного робота // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2000. – №1.С. – 155-162.
53. Лямина Е.А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 224–234.
54. Егоров С.А., Куценко А.С. Особенности построения системы управления угловой ориентацией теле- управляемого подводного аппарата // *Материалы X Международной научно-технической конференции*

«Современные методы и средства океанологических исследований». 2007.  
Ч. 2. С. 127–129.

55. Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 36–45.
56. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. - СПб: Питер, 2002. - 528 с.
57. Черных И.В. Simulink. Среда создания инженерных приложений - М: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. - 496 с.