

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

**Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

«На правах рукопису»
УДК 629.127

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) Надія Бурау
« ____ » _____ січня _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

**«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему:**

**«Керування кутом курсу автоматичного безпілотного підводного апарату за
наявності неконтрольованих збурень»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПГ-21мп
Михайловський Віталій Володимирович

(підпис)

Науковий керівник:

д.т.н., проф., завідувач кафедри КІОНС
Бурау Надія Іванівна

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна

(підпис)

Рецензент:

к.т.н., доцент
Філіппова Марина В'ячеславівна

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Михайловському Віталію Володимировичу

1. Тема дисертації «Керування безпілотним підводним апаратом за наявності неконтрольованих збурень»,
науковий керівник Бурау Надія Іванівна, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації: 07 січня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: процес керування безпілотним підводним апаратом.
4. Предмет дослідження: система керування кутом курсу; показники якості процесу керування за наявності неконтрольованих збурень.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Огляд стану проблеми: огляд безпілотних підводних апаратів (БПА) та систем керування їх рухом.
 - 5.2 Аналіз системи керування кутом курсу БПА, функціональних елементів системи та їх характеристик; обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
 - 5.3 Розробка програмної моделі системи керування, розробка методики моделювання, проведення моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
 - 5.4 Аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу БПА за наявності неконтрольованих збурень.

5.5 Обґрунтування шляхів забезпечення показників якості керування кутом курсу, розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем керування БПА.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у збірнику матеріалів доповідей НТК

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 1.			
РОЗДІЛ 2.			
РОЗДІЛ 3.			
РОЗДІЛ 4. Розробка стартап-проєкту			

9. Дата видачі завдання «10» жовтня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд стану проблеми	31.10.2023	
2.	Аналіз системи керування кутом курсу БПА, функціональних елементів та їх характеристик; моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень	10.11.2023	
3.	Розробка програмної моделі системи керування, розробка методики проведення моделювання	20.11.2023	
4.	Моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень	30.11.2023	
5.	Аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу БПА	10.12.2023	
6.	Забезпечення показників якості керування кутом курсу, розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем керування БПА	20.12.2023	
7.	Оформлення рукопису магістерської дисертації	29.12.2023	
8.	Оформлення презентації, підготовка до захисту	05.01.2024	

Студент

Віталій МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Науковий керівник дисертації

Надія БУРАУ

РЕФЕРАТ

У даній роботі проводиться дослідження системи керування кутом курсу автоматичного безпілотного підводного апарату за наявності неконтрольованих збурень.

Актуальність теми. Проблема розробки систем автоматичного керування для автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА) включає в себе вибір методів реалізації керування і вибір датчиків для отримання первинної інформації. Розвиток сучасних систем управління рухом у тривимірному просторі відбувається в умовах зростання вимог до ефективності досягнення основних цілей, таких як забезпечення бажаної точності параметрів управління рухомими об'єктами. Водночас існують вимоги до підвищення надійності та тривалості функціонування, при умовах жорстких обмежень характеристик енергоефективності.

Останнім часом датчики, засновані на технології мікроелектромеханічних систем (МЕМС), здобувають все більший інтерес як від розробників інерціальних вимірювачів, так і від споживачів цих пристроїв. Проаналізувавши різні системи керування сучасних АБПА, легко дійти висновку, що МЕМС датчики здобули широке визнання та поширення в цій галузі завдяки своїм унікальним характеристикам. Компактні розміри та мала вага МЕМС датчиків сприяють їхньому інтегруванню в обмежений об'єм апарату, не обтяжуючи його структуру. Достатньо висока чутливість цих датчиків роблять їх прийнятними для вимірювання прискорення, кутової швидкості та інших параметрів, необхідних для ефективного керування рухом АБПА. Більше того, їхні низькі вартість та висока енергоефективність сприяють їх використанню в системах, де обмежені ресурси, що є важливим аспектом у сфері автономних підводних технологій.

Однак, незважаючи на свої переваги, слід відзначити, що точність мікромеханічних датчиків наразі не завжди може повністю задовольнити всі потреби. Похибки вимірювань мікромеханічних приладів часто виникають через температурні впливи, вібрації та перехресне прискорення. Ще однією причиною виникнення похибок у вимірюваннях є шум. Тому розробка та вдосконалення

системи керування для забезпечення ефективного функціонування в умовах неконтрольованого впливу фізичних та параметричних збурень є актуальною задачею.

Мета і завдання досліджень.

Метою даних досліджень є визначення впливу на динамічні характеристики системи керування АБПА похибок, детермінованих завад, шумів датчиків інформації та зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети в кваліфікаційній роботі виконуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд безпілотних підводних апаратів (БПА), та систем керування їх рухом.
2. Аналіз системи керування кутом курсу БПА, функціональних елементів системи та їх характеристик; обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
3. Розробка програмної моделі системи керування, розробка методики моделювання, проведення моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
4. Аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу БПА за наявності неконтрольованих збурень.
5. Обґрунтування шляхів забезпечення показників якості керування кутом курсу, розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем керування БПА.

Об'єктом дослідження є процес керування безпілотним підводним апаратом.

Предметом дослідження є система керування кутом курсу; показники якості процесу керування за наявності неконтрольованих збурень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Встановлено вплив на показники якості перехідного процесу системи керування кутом курсу АБПА шумів МЕМС-датчиків кутової швидкості

та MEMC-датчиків кута, який полягає у збільшенні тривалості перехідного процесу та наявності відхилень перехідної характеристики від усталеного значення.

2. Встановлено вплив на показники якості перехідного процесу системи керування кутом курсу АБПА неконтрольованих зовнішніх збурень (удар, вибух, хитавиця), який полягає у короткочасному відхиленні АБПА від заданого курсу з наступним поверненням до заданого курсу.

Апробація роботи. Часткові результати роботи були обговорені на наступній конференції:

- XIX Наукова-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20-21 грудня 2023 року.

Публікації. За матеріалами дисертації було опубліковано матеріали доповідей на науково-практичній конференції.

Михайловський В. Моделювання впливу шуму датчиків інформації в системі керування підводним апаратом. Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні (20-21 грудня 2023 року), КПІ ім. Ігоря Сікорського, приладобудівний факультет, Київ, 2023.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, 33 рисунків, 24 таблиць, списку використаної літератури із 35 позицій. Загальний обсяг роботи 113 сторінок, з яких основна частина викладена на 94 сторінках.

Ключові слова: автономний безпілотний підводний апарат (АБПА), система керування (СК), мікроелектромеханічні системи (MEMC).

ABSTRACT

In this work, a study of the steering angle control system of an autonomous underwater vehicle in the presence of uncontrolled disturbances is carried out.

Actuality of theme. The problem of developing automatic control systems for autonomous underwater vehicles (AUVs) includes the choice of control implementation methods and the choice of sensors for obtaining primary information. The development of modern traffic control systems in three-dimensional space is taking place in conditions of increasing requirements for the efficiency of achieving the main goals, such as ensuring the desired accuracy of the control parameters of moving objects. At the same time, there are requirements to increase the reliability and duration of operation, under conditions of strict limitations of energy efficiency characteristics.

Recently, sensors based on the technology of microelectromechanical systems (MEMS) are gaining increasing interest both from developers of inertial meters and from consumers of these devices. Having analyzed various control systems of modern AUVs, it is easy to conclude that MEMS sensors have gained wide recognition and distribution in this field due to their unique characteristics. The compact size and light weight of MEMS sensors contribute to their integration into the limited volume of the device without burdening its structure. Sufficiently high sensitivity of these sensors makes them suitable for measuring acceleration, angular velocity and other parameters necessary for effective control of AUV movement. Moreover, their low cost and high energy efficiency facilitate their use in resource-constrained systems, which is an important aspect in the field of autonomous underwater technologies.

However, despite its advantages, it should be noted that the accuracy of micromechanical sensors currently cannot always fully satisfy all needs. Measurement errors of micromechanical devices often arise due to temperature effects, vibrations and cross acceleration. Another cause of errors in measurements is noise. Therefore, the development and improvement of the control system to ensure effective functioning in the conditions of uncontrolled influence of physical and parametric disturbances is an urgent task.

Purpose of the work and objectives.

The aim of the work is to determine the influence of errors, deterministic disturbances, information sensor noise and external disturbances on the dynamic characteristics of the AUV control system.

To achieve the goal, the following tasks are performed in the qualification work:

1. Overview of the state of the problem: an overview of unmanned underwater vehicles (UUVs) and their motion control systems.
2. Analysis of the UUV course angle control system, functional elements of the system and their characteristics; justification of models of potential parametric and external uncontrolled disturbances.
3. Development of a software model of the control system, development of modeling techniques, simulation of the control system in the presence of parametric and external uncontrolled disturbances.
4. Analysis of dynamic characteristics of the control system and indicators of the quality of control of the angle of the UUV course in the presence of uncontrolled disturbances.
5. Justification of ways to ensure quality indicators of course angle control, development of recommendations for further improvement of UUV control systems.

The object of research is the process of controlling an unmanned underwater vehicle.

The subject of the research is the course angle control system; indicators of the quality of the control process in the presence of uncontrolled disturbances.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The impact on the quality indicators of the transient process of the AUV course angle control system of the noise of MEMS angular velocity sensors and MEMS angle sensors was established, which consists in increasing the duration of the transient process and the presence of deviations of the transient characteristic from the established value.

2. The impact on the quality indicators of the transient process of the AUV course angle control system of uncontrolled external disturbances (impact, explosion, swaying) was established, which consists in a short-term deviation of the AUV from the set course followed by a return to the set course.

Approbation of work. Partial results of the work were discussed at the following conference:

- XIX Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Efficiency and automation of engineering solutions in instrumentation", December 20-21, 2023.

Publications. Based on the materials of the dissertation, the materials of reports at the scientific and practical conference were published.

Mykhailovskyi V. Modeling the effect of information sensor noise in the underwater vehicle control system. Efficiency and automation of engineering solutions in instrument construction (December 20-21, 2023), KPI named after Igor Sikorskyi, Faculty of Instrumentation, Kyiv, 2023.

Structure and scope of work. The work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, 33 figures, 24 tables, a list of used literature with 35 items. The total volume of work is 113 pages, of which the main part is laid out on 94 pages.

Keywords: autonomous underwater vehicle (AUV), control system, microelectromechanical systems (MEMS).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ	16
1.1 Безпілотні підводні апарати.....	16
1.1.1 Телекеровані безпілотні підводні апарати	17
1.1.2 Автономні безпілотні підводні апарати	18
1.2 Огляд систем керування безпілотних підводних апаратів	20
1.3 Система керування АБПА Maribot LoLo.....	23
1.4 Фізичні елементи систем керування безпілотних підводних апаратів	26
1.5 Автономний безпілотний підводний апарат з використанням мікроелектромеханічних датчиків.....	28
1.6 Огляд раніше виконаних робіт	30
1.7 Мета і завдання досліджень	34
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КУТОМ КУРСУ АБПА.....	36
2.1 Структурна схема та математична модель системи керування кутом курсу АБПА	36
2.2 Аналіз функціональних елементів системи та їх характеристик.....	40
2.2.1 Мікромеханічні акселерометри	42
2.2.2 Мікромеханічні гіроскопи.....	44
2.3 Обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.....	50
2.3.1 Варіації Аллана	50
2.3.2 Визначення шумових характеристик ММГ методом варіацій Аллана....	54
2.3.3 Моделі потенційних неконтрольованих збурень	56
2.4 Моделювання параметричних та зовнішніх збурень	59
Висновки до розділу 2	64

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА ЗОВНІШНІХ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ЗБУРЕНЬ	66
3.1 Опис моделі в середовищі Simulink	66
3.2 Методика моделювання.....	68
3.3 Проведення моделювання і аналіз результатів	74
Висновки до розділу 3	84
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЗА НАЯВНОСТІ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ЗБУРЕНЬ»	87
4.1 Опис ідеї проекту та технологічний аудит ідеї проекту	87
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	90
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	98
4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту та бізнес-моделі стартап-проекту	101
Висновки до розділу 4	106
ВИСНОВКИ.....	107
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	109
ДОДАТОК А.....	113

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

LSB - least significant bit;

PSD - power spectral density;

RMS - root mean square;

АБПА — автономний безпілотний підводний апарат;

БПА — безпілотний підводний апарат;

ІВП — інерціальний вимірювальний пристрій;

ММГ - мікромеханічний гіроскоп;

СК – система керування;

ТБПА — телекерований безпілотний підводний апарат;

ВСТУП

Розробка та вдосконалення безпілотних підводних технологій вимагає від інженерів і науковців потреби у пошуку нових методів управління рухом і забезпечення довготривалої автономної роботи безпілотних підводних апаратів (БПА), особливо тих, які призначені для багатоцільового використання. Швидкий прогрес розвитку безпілотної техніки для пошуково-рятувальних операцій на великій глибині, обстеження підводних об'єктів, океанографічних досліджень і моніторингу морського середовища нерозривно вплетений у сучасну концепцію створення компактних автономних інтелектуальних рухомих систем для різноманітних завдань у фізичних середовищах.

Однак одним із найважливіших етапів у розробці БПА є розробка якісної системи керування рухом (СК). Система керування несе відповідальність за маневрування апаратом для виконання певних завдань керування, таких як утримання бажаної швидкості чи курсу, або слідування за визначеною траєкторією. Управління підводними апаратами є непростим, так як вони представляють собою складні багатовимірні нелінійні динамічні системи, які працюють за умов наявності перехресної взаємодії між їхніми ступенями свободи, мають високу невизначеність параметрів та зовнішні впливи, такі як течії та хвилі. Проблема керування стає ще складнішою через наявність неконтрольованих збурень, які можуть бути спричинені такими чинниками, як течії, хвилі, магнітні варіації та наявності підводних перешкод. Всі ці фактори можуть впливати на рух та поведінку підводного апарата а, отже, мають прямий вплив на систему його керування.

Дослідження впливу цих збурень дозволяє покращити ефективність та точність систем керування БПА. Адаптація алгоритмів керування до мінливих умов середовища та врахування неконтрольованих факторів допомагають забезпечити надійність керування в різних умовах.

Зокрема, врахування неконтрольованих збурень у системі керування може сприяти уникненню аварій, підвищенню точності навігації, а також забезпечити безпечні умови для виконання завдань підводним апаратом. Тому розробка

системи керування на основі повної математичної моделі з врахуванням впливів неконтрольованих збурень вимагає значних затрат часу та подальших досліджень.

Мета і завдання досліджень.

Метою даних досліджень є визначення впливу на динамічні характеристики системи керування АБПА похибок, детермінованих завад, шумів датчиків інформації та зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети в кваліфікаційній роботі виконуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд безпілотних підводних апаратів (БПА), та систем керування їх рухом.
2. Аналіз системи керування кутом курсу БПА, функціональних елементів системи та їх характеристик; обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
3. Розробка програмної моделі системи керування, розробка методики моделювання, проведення моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
4. Аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу БПА за наявності неконтрольованих збурень.
5. Обґрунтування шляхів забезпечення показників якості керування кутом курсу, розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем керування БПА.

Об'єктом дослідження є процес керування безпілотним підводним апаратом.

Предметом дослідження є система керування кутом курсу; показники якості процесу керування за наявності неконтрольованих збурень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Встановлено вплив на показники якості перехідного процесу системи керування кутом курсу АБПА шумів МЕМС-датчиків кутової швидкості та МЕМС-датчиків кута, який полягає у збільшенні тривалості

перехідного процесу та наявності відхилень перехідної характеристики від усталеного значення.

2. Встановлено вплив на показники якості перехідного процесу системи керування кутом курсу АБПА неконтрольованих зовнішніх збурень (удар, вибух, хитавиця), який полягає у короткочасному відхиленні АБПА від заданого курсу з наступним поверненням до заданого курсу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методики моделювання, розробці програмних моделей системи керування з урахуванням моделей неконтрольованих збурень (зокрема параметричних збурень реальних МЕМС-датчиків).

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Безпілотні підводні апарати

Упродовж останніх двох-трьох десятиліть, в різних країнах, які володіють провідними позиціями в сфері морських технологій, було розроблено значну кількість безпілотних підводних апаратів для розв'язання різноманітних наукових та практичних завдань, пов'язаних з вивченням та освоєнням океану. Протягом короткого періоду часу БПА вже продемонстрували свою високу ефективність у виконанні складних операцій з огляду і пошуку на великих глибинах, а також відкрили нові можливості для морської геологічної розвідки, вивчення підводного середовища і екологічного моніторингу водних ресурсів.

Для успішного використання підводних апаратів не менш важливою є висока якість системи керування рухом. У розробці алгоритмів керування використовуються вихідні дані, такі як рівняння руху підводного апарату, характеристики джерела інформації та виконавчих механізмів. Алгоритми керування розробляються на основі активної адаптивної моделі та урахування похибок параметрів моделі та підводного апарату для обчислення загальних сил, необхідних для забезпечення його керування та стабілізації.

БПА є підводними автоматизованими засобами, які можуть функціонувати під водою без участі людини. Ці апарати можна розділити на дві загальні категорії [1]:

- телекеровані безпілотні підводні апарати (ТБПА) або дистанційно керовані підводні апарати (ДКПА) (Remote Operated Vehicle – ROV);
- автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) (Autonomous Underwater Vehicle – AUV);

У випадку ТБПА управління відбувається за допомогою людини-оператора, тоді як АБПА є повністю автоматизованими і можуть працювати незалежно від прямого втручання людини. Хоча бувають і випадки коли керування АБПА вимагає періодичних втручань оператора для внесення корекцій у програму СК, які обумовлені принципом її роботи. Такі апарати називають напівавтономними (Semi-Autonomous Underwater Vehicle).

1.1.1 Телекеровані безпілотні підводні апарати

Характерною ознакою ТБПА є вимога присутності людини-оператора, яка має безпосередній контроль над апаратом, а також каналу зв'язку (електричний кабель/трос), який з'єднує їх із поверхнею або будь-яким місцем, де розташована станція керування.

ТПБА використовуються, коли занурення є недоцільним і небезпечним для людей або для дослідження на великій глибині. Такі апарати оснащені відеокамерами, ліхтарями та роботизованими руками, щоб захоплювати об'єкти в просторі. ТПБА часто використовуються в ряді галузей промисловості для завдань спостереження, інспекції та втручання.

ТПБА розбиваються на категорії по розміру. Термінологія може відрізнитися залежно від галузі та операторів, але, як правило, для визначення діапазонів розмірів використовується наступна класифікація [2]:

- ТПБА робочого класу (Work Class ROV);
- ТПБА полегшеного робочого класу (Light Work Class ROV);
- ТПБА класу спостереження (Inspection (or Observation) ROV);
- ТПБА класу міні/мікро (Mini or Micro (Portable) ROV);

ТПБА робочого класу. Мають доволі габаритні розміри та важать до кількох тон. Вони потребують великого надводного судна, системи запуску та підйому для розгортання та кількох висококваліфікованих операторів для роботи з різними датчиками, елементами керування та великими маніпуляторами. Використовуються для встановлення, ремонту, контролю, обслуговування та

відновлення морської інфраструктури, включаючи підводні колектори та бурові установки [2].

ТПБА полегшеного робочого класу. Важать кілька сотень кілограмів. Їх можна використовувати з менших суден.

ТПБА класу спостереження. Мають вагу близько 100 кг і можуть бути розгорнуті з набагато менших суден. Через їхні менші розміри та технологічні обмеження вони, як правило, використовуються для візуального огляду та для менших навантажень, ніж апарати робочого класу [2].

ТПБА класу міні/мікро. Мають вагу до 50 кг, тому їх можуть розгорнути та підняти одна або дві людини. Портативні ТПБА зараз стають найпоширенішим класом апаратів для «швидких і планових» перевірок підводних об'єктів та інфраструктури [2].

1.1.2 Автономні безпілотні підводні апарати

Автономний безпілотний підводний апарат (АБПА) — це безпілотний підводний апарат, який не потребує введення чи керування в режимі реального часу з боку людини-оператора чи водія, а отже, такий пристрій працює автономно [3, 4].

АБПА є автоматизованими приладами, які попередньо запрограмовані на параметри місії, а потім розгорнуті у водоймі. Як і ТПБА їх класифікують за масою [3]:

- малогабаритні або переносні (Man-Portable AUV, до 100 кг);
- легкі (Light Weight AUV, 100 – 500 кг);
- важкі (Heavy Weight AUV, 500 – 2000 кг);
- великі (Large AUV, більше 2000 кг).

Також АБПА можна поділити на різні види залежно від конструкції, відповідно до якої вони можуть дрейфувати, рухатися або плавати у воді [3, 4]:

- з традиційними гідродинамічними конфігураціями (циліндричною, торпедоподібною, краплеподібною, сигароподібною, плоскою та комбінованою);

- глайдери з рушійною системою, заснованою на зміні власної (залишкової) плавучості апарата;
- «сонячні» АБПА, оснащені сонячними панелями для підзарядки під час спливання на поверхню води і мають характерну плоску форму;
- створені з використанням біонічних принципів (наприклад, апарати з рушіями типу плавник).

Відповідно до конфігурації АБПА може бути оснащений активною силовою установкою (водомет або гвинт з приводом від двигуна). Такі апарати називають самохідними (self-propelled), вони можуть розвивати більшу швидкість і є більш маневреними, ніж несамохідні (non-propelled) АБПА, але мають менший термін служби батареї та зазвичай використовуються в місіях тривалістю від кількох годин до днів. Несамохідні АБПА або дрейфують без використання власної рушійної сили, або рухаються вгору та вниз крізь товщу води, змінюючи свою плавучість. Такі АБПА майже не споживають енергії порівняно з самохідними АБПА, але вони набагато менш маневрені та зазвичай використовуються в місіях, що тривають від тижнів до місяців [3].

АБПА можуть нести різні датчики на борту. Пакети датчиків можуть включати відеокамери або фотокамери, гідролокатори, магнітometri, флуорометри (датчики хлорофілу), датчики розчиненого кисню, датчики температури та глибини, датчики рН і датчики каламутності (концентрації зважених часток). АБПА також можуть бути оснащені GPS-навігацією, однак, оскільки радіохвилі не можуть поширюватися через воду, АБПА може отримувати сигнал GPS лише на поверхні. Під водою АБПА використовує своє останнє відоме положення GPS і обчислює свій рух за допомогою бортової інерціальної навігаційної системи, яка вимірює швидкість, прискорення та орієнтацію АБПА. Глибину занурення АБПА можна розрахувати за допомогою датчика тиску. Залежно від місії АБПА може часто спливати на поверхню, щоб отримати новий сигнал GPS і передавати дані, або він може провести всю свою місію під водою[3].

Також ведуться розробки водних апаратів, кінематика руху яких основана на біонічних принципах [4]. Незважаючи на те, що механічна «риба» має відмінні

маневрені характеристики, важким є досягнення конкурентної автономності в порівнянні з класичними АПБА. Обмеження ємності акумуляторів стало важливим фактором, який перешкоджає застосуванню біонічних принципів в дослідженні океану.

АБПА мають безліч можливостей до підводних застосувань. Їх можна використовувати для комерційних цілей, таких як розвідка родовищ нафти і газу або визначення місця уламків кораблів і літаків, для військових цілей, таких як розвідка або бойове використання в якості зброї, і для дослідницьких програм, таких як картографування океану або вимірювання фізичних властивостей водяного стовпа.

1.2 Огляд систем керування безпілотних підводних апаратів

Автономні підводні апарати широко використовуються і довели свою ефективність у таких завданнях, як безпечне транспортування, моніторинг території та картографування морського дна. Розробляючи системи навігації та управління АБПА, інженери повинні забезпечити необхідні рівні точності та надійності для вирішення завдань навігації та управління рухом в автономному підводному режимі при обмеженнях габаритних розмірів і споживаної потужності АБПА.

Система керування БПА може передбачати ручне та автоматичне керування. Ручне керування здійснюється в режимі реального часу оператором. Зв'язок з апаратом може здійснюватися через кабель за допомогою електричного або оптичного сигналу. Також є варіанти передачі сигналу через радіохвильову або гідроакустичну системи зв'язку.

Гідроакустична система керування

Гідроакустична система керування (ГСК) представляє собою комплекс засобів, спрямованих на вплив на об'єкт у водному середовищі, де поширюються гідроакустичні хвилі. ГСК включає в себе передавальні та приймальні станції [5]. На ринку існує різноманітні гідроакустичні системи керування, які відрізняються

за дальністю дії, сигнальною модуляцією та складом елементів. Параметри системи визначаються такими чинниками, як розташування приймальних і передавальних блоків, масо-габаритні та енергетичні характеристики окремих компонентів та системи в цілому. Для вирішення цих питань потрібно визначити місце розташування системи та спеціалізованих гідроприймачів та передавачів у певному секторі, де передбачається використання ГСК. Зазвичай ГСК складається з наступних компонентів: пульта оператора, блоку живлення, гідроприймача, гідропередавача, спеціальних ліній зв'язку, антенного модуля та додаткових блоків для формування та фільтрації сигналу. Недоліками такої системи є використання обмеженої групи спеціалізованих та дорогіших матеріалів, велика витрата енергії та складність конструкції елементів системи, а також потреба в додаткових засобах (таких як судно, літак або гвинтокрил), а також розташування гідроприймачів та передавачів для забезпечення надійного сигналу керування.

Радіохвильова система керування

Радіохвильова система керування (РСК) представляє собою комплекс засобів та операцій, спрямованих на контроль місця розташування об'єкта в просторі. Використання електромагнітних радіохвиль є досить поширеним в наземному, повітряному і космічному середовищах, але їх застосування в морській і підводній діяльності обмежене. Водний та підводний простори мають свої обмеження для різних діапазонів радіохвиль - довгі, середні, короткі та ультракороткі. Проте наддовгі хвилі можуть відбиватися від іоносфери та поширюватися далеко за горизонт і проникати в глибокий підводний світ без значних перешкод. Недоліками РСК є складність побудови системи, високі вимоги до енергоспоживання системи, а також вимоги до якості та розміщення блоків приймача та передавача, додаткових пристроїв для підсилення сигналу та вимоги до антен приймача і передавача, які встановлюються на об'єкті [5].

Кабельна система керування

Кабельна система управління представляє собою комплекс засобів, що використовують кабель-троси для передачі електричних сигналів до керуючих

органів. На сучасний день кабельні системи управління є однією з найпоширеніших систем для надійного передавання електричних сигналів та інформації. Принцип роботи кабельної системи є досить простим: кілька кабельних каналів, об'єднаних в один або декілька кабельних тросів, встановлюють зв'язок між станцією управління і об'єктом управління. Недоліками кабельної системи є значно обмежена можливість маневрування підводного апарата, потреба в додатковому обладнанні для перенесення елементів кабельної системи та високі вимоги до якості кабель-тросів, використовуваних в системі. Проте є можливість забезпечення живлення БПА шляхом передачі енергії через силовий кабель [5].

Інтелектуальна система керування

Інтелектуальна система керування (ІСК) – сукупність алгоритмічних та технічних засобів для автоматичного визначення місцезнаходження об'єкта, створення маршруту його руху та надсилання керуючих сигналів на різні рухові елементи, такі як мотори, рульові механізми та аерогідродинамічні поверхні. Основною метою ІСК для підводних апаратів є автоматичне формування оптимального шляху руху на основі зовнішньої інформації, яку отримують сенсори. Також вона дає можливість позбавитись обмежень у вигляді тросів або потреби у постійному керуванні. ІСК дозволяє АБПА самостійно рухатися по заданій траєкторії на заданій глибині і швидкості. АБПА також може мати систему запобігання зіткненням, яка використовує показання акустичного далекоміра для оцінки часу до зіткнення на основі аналітичної моделі АБПА. Якщо виявлено можливе зіткнення, інформація передається на контроль-систему, щоб можна було вжити подальших відповідних дій. Такі СК мають дуже високу затребуваність. Наразі доступні лише спеціалізовані рішення для вузьких підзадач загальної проблематики, де більшість пристроїв призначена для конкретної, специфічної конструкції та завдань, які має виконувати автономний безпілотний підводний апарат [5].

З розвитком мікроелектромеханічних технологій процес створення ІСК стає більш простим. Використання МЕМС-датчиків, які здатні вимірювати різні

параметри, збільшує доступність інформації та робить керування підводними апаратами більш автономним, знижуючи споживання енергії та збільшуючи тривалість автономної роботи. Однак із зростанням обсягу інформації виникає проблема вибору оптимального алгоритму та методу обробки сенсорних даних та створення сигналів для автоматичного управління. Перевагами ІСК порівняно з іншими системами є підвищення автономності роботи підводного апарата, зменшення енергоспоживання, відносна конструктивна простота створення керуючих блоків та використання загальних та стандартизованих компонентів для будівництва частин системи [4].

Навігаційна система АБПА може бути побудована на основі безплатформної інерціальної навігаційної системи (БІНС). Після виходу на поверхню корекція орієнтації та навігації системи виконується з використанням даних, отриманих від системи супутникової навігації (Global Navigation Satellite System). Під водою корекція положення та швидкості БІНС виконується за допомогою акустичної навігаційної системи і даних з доплерівського датчика швидкості (Doppler Velocity Log - DVL) [4, 6].

1.3 Система керування АБПА Maribot LoLo

Maribot LoLo — це автономний підводний апарат, розроблений у KTH Center for Naval Architecture в рамках Шведського центру морської робототехніки (Swedish Maritime Robotics Centre - SMaRC). У той час як більшість комерційно доступних АБПА розроблені для виконання вузькоспеціалізованих місій, дослідницький Maribot LoLo має відкрити нову нішу, забезпечуючи попит на більш універсальні АБПА. Основне завдання у його проектуванні полягає в тому, щоб створити добре діючий і водночас універсальний апарат [6, 7].

Maribot LoLo розроблений як багатоцільова демонстраційна та експериментальна платформа для широкого спектру наукових застосувань. У процесі інженерного проектування було винесено наступні концепції, яким має відповідати апарат: надійність, міцність, стійкість, адаптивність, модульність,

модифікованість. Надійність, міцність і стійкість в першу чергу впливають на витривалість системи, тобто здатність апарату виконувати завдання та залишатися активним протягом тривалого періоду часу, включаючи його здатність витримувати будь-які несправності. Інші три концепції сприяють універсальності (або гнучкості) системи, тобто тій мірі, відповідно до якої апарат може забезпечити експлуатаційну придатність в широкому та мінливому спектрі робочих умов [6].

Конструкція корпусу Maribot LoLo обтічна і відрізняється від класичної торпедоподібної форми. Натомість було обрано прямокутний переріз у відношенні 7 до 4 з міркувань обслуговуваності (плоске дно краще для транспортування та обробки), доступності підсистем, ефективності упаковки та підвищеного гідродинамічного підйому (підтримка підводного ковзання). Корпус апарату має наступні розміри: 3,8 x 1,05 x 0,6 м. Маса становить приблизно 600 кг, але вона може змінюватися в залежності від того, що розміщено у відсіку корисного навантаження об'ємом 0,4 м³, розташованому в носовій частині. Максимальна швидкість становить приблизно 2 м/с [7].

Апарат оснащений системою змінної плавучості, яка призначена для підтримання нейтральної плавучості під час заглиблень, чим значно полегшує керування. Маневрування здійснюється за допомогою двох гвинтів та рульових поверхонь, розташованих в задній частині корпусу. Для компенсації крутного моменту гвинти обертаються в різні сторони [7].

Головною ідеєю архітектури системи керування є чітке розділення на дві підсистеми: система керування рухом та системи керування місією [6].

Система керування рухом включає всі підсистеми, параметри яких є важливими для коректності роботи, такі як навігація, супровід, контроль і моніторинг стану апарату. Основою цієї системи є керуючий комп'ютер, який має найвищі бортові повноваження. Він запускає критичні процеси в режимі реального часу, такі як навігація, контроль і безпека, а також низькорівневе керування серед інших процесів. Крім того, він відповідає за реєстрацію даних і керування управляючою шиною та шиною, яка обробляє дані між різними підсистемами.

Система керування місією складається з наукових приладів, які вважаються корисним навантаженням. Вони можуть відрізнитись в залежності від конкретної місії та можуть не мати істотного значення для цілісності апарату. Система керування місією може бути модульною, оскільки вона не залежить від системи керування апарату. Її основним компонентом є інший комп'ютер, який не має прямого доступу до основних датчиків, але може запросити надати такі дані. Саме в цій системі програмуються параметри місії. Зв'язок між цими системами здійснюється через канал передачі даних місії. Ключовою особливістю цієї архітектури є значне підвищення надійності.

Для визначення положення у просторі АНПА Maribot LoLo використовує базову технологію локалізації. Вихідне позиціонування отримується через глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), але вони доступні лише на поверхні. Під час занурення АНПА використовує інерціальну навігаційну систему (ІНС), яка відраховує його положення відносно початкового. Основним датчиком для ІНС є система, яка включає в себе акселерометр, магнітометр і гіроскоп (Attitude and Heading Reference System - AHRS), що дозволяє отримати орієнтацію та прискорення апарату. Робота цієї системи підтримується доплерівським датчиком для забезпечення більш точного вектора швидкості. Обчислення положення апарату проводиться за допомогою розширеного фільтра Калмана [6]. ІНС також доповнюється датчиком глибини та висотоміром. У межах діапазону для навігації також можна використовувати систему гідроакустичну позиціонування USBL. Вона працює як модем і, фактично, є єдиним засобом підводного зв'язку. Після виходу на поверхню зв'язок встановлюється через супутниковий зв'язок Iridium або радіочастотний модем. Супутниковий зв'язок використовується для повідомлення про місцезнаходження та технічний стан або оновлення планів місії, тоді як радіочастотні модеми в основному використовуються для дистанційного керування транспортним засобом. Дистанційне керування здійснюється людиною. Однак супутниковий зв'язок перебуває під контролем системи керування місією. Тому цей модуль забезпечений джерелом безперебійного живлення, щоб забезпечити глобальний зв'язок у разі критичного збою системи [6, 7].

1.4 Фізичні елементи систем керування безпілотних підводних апаратів

Більшість АБПА належать до оглядового класу, мають продовговату циліндричну або торпедоподібну форму з одним або декількома гребними гвинтами. Така конструкція вважається найкращим компромісом між розміром, корисним об'ємом, гідродинамічною ефективністю та простотою використання. Деякі апарати використовують модульну конструкцію, що дозволяє операторам легко замінювати компоненти.

Виконавчі механізми автономного безпілотного підводного апарата (АБПА) відповідають за фізичне виконання команд і керування рухом апарата в водному середовищі. Вони забезпечують стабільність, маневреність та виконання завдань, встановлених для АБПА. Основні виконавчі механізми АБПА включають: двигуни, рульові приводи, рульові поверхні, механізм зміни плавучості тощо.

Типову реалізацію системи керування АБПА торпедоподібної форми переносного класу можна побачити у роботі [8].

В якості силової установки запропоновано безщітковий двигун постійного струму, підібраний відповідно до маси і розмірів апарату. Керування двигуном може здійснюватися з мікроконтроллера.

Здійснення маневрів відбувається за допомогою двох горизонтальних і двох вертикальних рульових поверхонь, які приводяться до руху сервоприводами.

Навігаційний комплекс апарату складається з інерціального вимірювального модуля (ІВМ), який включає в себе гіроскоп, акселерометр і магнітометр. З його допомогою визначається розташування, орієнтація і швидкість. Для вимірювання глибини використовується датчик тиску. Приймач GPS використовується для визначення положення, коли апарат знаходиться близько до поверхні води. Також використовується доплерівський датчик (DVL). Він надсилає та приймає звуковий сигнал, відбитий від морського дна, за яким розраховується вектор швидкості АБПА. Ця інформація в поєднанні з ІВМ дає можливість точного визначення положення та швидкості АБПА [8].

Для забезпечення керування АБПА використовується гідролокатор. Цей датчик використовується для уникнення перешкод на шляху. Зображення, доступні з цих датчиків, можна обробити для ідентифікації конкретних об'єктів. Гідролокатор може бути реалізований для різних застосувань, таких як сканер переднього огляду, спрямований донизу і датчик бокового сканування.

Відслідковування АБПА здійснюється за допомогою системи USBL (Ultra Short Baseline). USBL — це метод визначення місцезнаходження АБПА. Система USBL складається з трансивера та транспондера. Трансивер приєднується до основного корабля або іншого надводного транспортного засобу, а транспондер приєднується до АБПА або розміщується на морському дні. Передача та прийом акустичних імпульсів між трансивером і транспондером дозволяє системі USBL оцінити положення судна, з якого здійснюється керування, або положення АБПА відносно нього [8].

Також для зв'язку з апаратом під водою використовується гідроакустичний модуль. Підводний зв'язок — це спосіб обміну даними між надводним і підводним апаратом. Забезпечення такого зв'язку стикається з численними труднощами, такими як мала смуга пропускання, неможливість направлення сигналу та його ослаблення при передачі на далекі відстані. З огляду на такі обмеження, необхідний модуль для підводного зв'язку має низьку швидкість передачі даних. Система відстеження USBL також поєднана з модулем, щоб отримувати фактичні дані телеметрії апарату і надсилати їх на наземну станцію керування [8].

Живлення АБПА підтримується за допомогою DC-DC перетворювача і сучасних Li-Po акумуляторів. DC-DC перетворювач постійного струму обирається з розрахунку забезпечення достатньої потужності, необхідної для роботи всіх вузлів керування. Li-Po акумулятори в порівнянні з іншими типами (NiCd, NiMH) є найбільш придатними, оскільки мають більше співвідношення ємності до маси, яке становить майже 100–130 Вт·год/кг [8]. Порівняно з іншими акумуляторами, пропускну здатність на 1 кг більша, що дозволяє отримати таку саму напругу при меншій вазі. Завдяки такій перевазі вони, в основному, і використовуються для підводних апаратів.

Обчислювальний модуль складається з одноплатного комп'ютера (Single Board Computer - SBC). Він необхідний для обробки даних, отриманих від різних датчиків, і виконання алгоритму керування. А для реалізації взаємодії датчиків і виконавчих механізмів використовується додатковий мікроконтроллер [8].

1.5 Автономний безпілотний підводний апарат з використанням мікроелектромеханічних датчиків

Останнім часом мікромеханічні інерціальні датчики, засновані на технології мікроелектромеханічних систем (MEMS), набувають все більшого попиту як у виробників інерціальних вимірювачів, так і у споживачів цих пристроїв. Їх вигідні характеристики, такі як низька вартість, висока надійність і компактні розміри, є основними факторами, які сприяють їх швидкому розвитку. Ці переваги досягаються завдяки використанню групових технологій мікроелектроніки, які успішно адаптовані для виробництва мікромеханічних пристроїв [9].

Попри переваги у ціновому, розмірному та надійнісному аспектах, важливо відзначити, що точність мікромеханічних датчиків наразі не завжди може повністю задовольнити всі потреби. З цього приводу використання виключно мікромеханічних датчиків не завжди є можливим. Зазвичай створюються інтегровані системи, що включають блок інерціальних MEMS-датчиків і приймач сигналів із супутникової системи навігації (СНС).

Невисока ціна стала однією з головних причин обрання таких датчиків для створення прототипу АПБА у роботі [10]. В ній розглядається прототип АБПА, здатного автономно переміщатися по заданим координатам використовуючи контрольні датчики та виконавчі механізми для автономного пересування по маршруту. Для цього було розроблено систему керування на основі Arduino Mega з необхідною аналоговою та цифровою електронікою для інтеграції всіх елементів: датчиків (тиску, акселерометра, гіроскопа та компаса), приводів (серводвигунів) та силової електроніки для перемикача двигуна.

Усі електронні елементи управляються основною платою Arduino Mega. Периферійними пристроями для датчиків є GPS (Venus GPS) для визначення положення та модуль, який об'єднує акселерометр, гіроскоп і компас (IMU Razor 9). Arduino Mega використовує 8-розрядний мікроконтролер Atmel: ATmega 2560 з 256 КБ флеш-пам'яті, 8 КБ SRAM, 4 КБ EEPROM і тактовою частотою 16 МГц. Venus GPS передає сигнал GPS на мікроконтролер зі швидкістю 9600 біт/с через послідовну протокол передачі даних RS232. Частота оновлення досягає 20 Гц. Визначення місцезнаходження займає 29 секунд під час холодного запуску, споживаючи близько 67 мВт у режимі навігації. Точність становить близько 2,5 метрів [10].

Інший сенсорний модуль, IMU Razor 9, дає виміри по трьом осям в кожному із вбудованих сенсорів: акселерометр ADXL345, гіроскоп ITG-3200 і магнітометр HMC5843. Уся інформація, отримана від датчиків, обробляється 8-розрядним мікроконтролером Atmega328, що змонтована на одній PCB платі та надсилає дані через послідовний порт на плату Arduino зі швидкістю 38400 біт/с.

Основні характеристики акселерометру ADXL345 [11]:

- вимірювання по трьом осям;
- підтримувані інтерфейси: I2C / SPI;
- роздільна здатність: 10/13-bit (min. 4 mg/LSB);
- діапазон вимірювань: $\pm 2g$ / $\pm 4g$ / $\pm 8g$ / $\pm 16g$;
- ударні навантаження до 10000 g;

Характеристики гіроскопу ITG-3200 [12]:

- вимірювання по трьом осям;
- підтримувані інтерфейси: I2C;
- чутливість: 14,375 LSBs per $^{\circ}/\text{sec}$;
- повна роздільна здатність: $\pm 2000^{\circ}/\text{sec}$;
- ударні навантаження до 10000 g;

Розробка подібного дешевого АБПА з використанням МЕМС датчиків дасть можливість утримання групи таких апаратів в розгорнутому стані у визначеному

районі інтересів протягом тривалого періоду. Це може стати дуже корисним інструментом і додатковим джерелом інформації. Усі ці дані в поєднанні з показниками, які надають буї та морські планери, що використовуються для виконання тривалих місій на великі відстані, будуть цінними. Група недорогих АБПА в системі налаштованій на автоматичне перемикання в навігаційно-накопичувальних місіях може дозволити безперервну роботу з дослідження моря [10].

1.6 Огляд раніше виконаних робіт

При проектуванні системи управління безпілотним підводним апаратом, необхідно провести багато експериментів в умовах, які симулюють реальне водне середовище або наближені до нього. Однак це може бути витратним процесом. Тому виникає необхідність розробки інструментів, які дозволили б проводити експерименти в напівнатуральних умовах. В цьому випадку об'єктом керування для системи управління БПА стає його математична модель. Цей підхід дозволяє зменшити витрати і прискорити процес отримання результатів.

У роботі [13] обговорюється система керування рухом для автономних підводних апаратів, що охоплює як керування положенням, так і швидкістю в горизонтальній площині, а також комбіноване керування вертикальної і кильової хитами у вертикальній площині. Для створення цієї системи керування була розроблена комплексна математична модель з шістьма ступенями свободи для підводних апаратів, що робить її адаптованою для різних типів підводних апаратів на основі їхніх унікальних фізичних характеристик. Використовуючи цю загальну математичну модель, була створена платформа моделювання для оцінки характеристик руху апарату: його стабільності та керованості.

У роботі [14] було запропоновано використання ковзного режиму керування (sliding mode control - SMC) в системі керування. Проведені дослідження доводять його стійкість до невизначеності параметрів, що робить його вигідним для

впровадження у систему, особливо з огляду на складну та пов'язану нелінійну модель підводного апарату.

У роботі [15] були проведені дослідження та оцінка системи навігації та керування рухом АБПА. Моделювання проводились на основі даних, отриманих від інерціального вимірювального модуля тактичного класу, встановленого на апараті. Оцінку та налаштування системи керування проводили за допомогою комп'ютерного моделювання на основі аналітичної моделі. Моделювання показало, що АБПА успішно пройшов заздалегідь визначені маршрутні точки. Однак калібрування інерціального вимірювального модуля не було ретельно досліджено та описано, що можна вважати головним обмеженням цього дослідження. Хоча похибки цього модуля передбачаються в режимі реального часу за допомогою фільтра Калмана, але його продуктивність можна суттєво покращити шляхом впровадження спеціальної процедури калібрування, яка враховуватиме зміщення осі, температурні дрейфи та інші помилки.

У магістерській дисертації [7] було оцінено дві різні системи керування: одна використовує виключно ПІД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні), а інша включає лінеаризацію зворотного зв'язку в поєднанні з ПІД-регуляторами. Обидві системи керування використовували роз'єднане керування для керування швидкістю, глибиною та курсом руху. Результати моделювання вказують на те, що обидві системи керування можуть забезпечувати плавний і добре демпфований рух, особливо при керуванні одним ступенем свободи одночасно. Перша система керування була налаштована шляхом розміщення полюсів, тоді як друга була автоматично налаштована шляхом оновлення параметрів моделі в лінеаризації зворотного зв'язку. Основною метою даної дипломної роботи була розробка методу автоматизованого налаштування системи керування автономним підводним апаратом (АБПА). Результати моделювання демонструють покращену продуктивність керування, досягнуту завдяки запропонованому підходу до автоматичного налаштування.

Аналіз та синтез системи керування АБПА для досягнення різних режимів руху було розглянуто в дослідженні [8]. Перш за все, система керування АБПА

генерує бажану траєкторію від поточного положення апарату до бажаного положення, з урахуванням можливих перешкод. Архітектура системи керування має забезпечити виконання законів керування для різних режимів руху, включаючи:

1. Режим "Відстеження Траєкторії" (Trajectory Tracking): Для цього режиму система керування створює складний закон керування, щоб забезпечити точне слідування заданій траєкторії, яка має чіткі координати положення у часі.

2. Режим "Відслідковування Шляху" (Path-Following): У цьому режимі апарат відслідковує весь шлях без обмежень у часі, траєкторія задається геометричним описом. Закон керування розробляється так, щоб спрямовувати апарат на бажаний шлях.

3. Режим "Відстеження Точки Шляху" (Way Point Tracking): Цей режим відрізняється тим, що серія точок розташовується між фактичним положенням АБПА та бажаним положенням. Керування апаратом формується від точки до точки, щоб досягти бажаного положення відповідно до заданих точок маршруту.

Для управління такими складними режимами руху пропонується використовувати нелінійні регулятори, такі як ті, які базуються на нечіткій логіці, оскільки повна математична модель динаміки АБПА включає нелінійні рівняння руху з різними нелінійними складовими, такими як додана маса, гідродинамічне демпфування та зовнішні збурення середовища.

У роботі [16] показано розробку системи керування для автономного підводного апарату, призначеного для спостереження за океаном. Апарат, який є гібридом між автономними підводними апаратами і автономними надводними апаратами, рухається по поверхні моря і здійснює вертикальні занурення, щоб отримати профілі водяного стовпа, відповідно до заздалегідь встановленого плану. Переміщення транспортного засобу на поверхні дозволяє здійснювати навігацію через GPS і телеметричний зв'язок за допомогою радіомодему. Навігаційна система оснащена цифровим компасом ТСМ-2.6. Розроблена платформа надійна і має переваги компактності та легкості, що значно підвищує її простоту в управлінні та

експлуатації. Апарат має інтегрований комп'ютер, відповідальний за нагляд за системами навігації, руху та безпеки.

У роботі [17] запропоновано підхід до розробки та дослідження системи автоматичного керування, яка передбачає урахування не лише динаміки руху, але й конструктивних особливостей апарата, які впливають на гідродинамічні коефіцієнти. Також враховується визначення параметрів руху в залежності від отриманих значень гідродинамічних коефіцієнтів. Додатково використовуються параметри орієнтації та навігації як інформація зворотного зв'язку для поліпшення точності та якості керування апаратом.

В багатьох із розглянутих робіт [6 - 8, 10, 17 - 19] в якості датчиків інформації пропонується використовувати саме МЕМС датчики. Такий вибір обумовлено невеликими розмірами, що дозволяє використовувати їх в АБПА невеликого розміру. Також важливими чинниками є їх доступність з точки зору ціни та тривіальність інтеграції у систему.

У роботі [20] було синтезовано модель системи керування кутом курсу БПА на основі спрощеної моделі. Було досліджено її роботу в різних режимах та проведено аналіз похибок керування. Відповідно до результатів запропоновано шляхи їх зменшення та підвищення точності системи керування БПА.

З огляду раніше виконаних робіт видно, що багато з них присвячено розробці математичних моделей систем керування, впровадженню різних підходів до моделювання. Розробляються різні архітектури систем керування, які б дозволяли здійснювати керування апаратом за різних режимів роботи [8]. Також у роботах пропонуються різні конфігурації систем керування, описуються їх функціональні елементи.

В більшості з розглянутих робіт недостатньо приділяється увага аспектам роботи систем керування в умовах, що можуть бути визначені як несприятливі. Важливість адекватного функціонування систем керування в різноманітних та екстремальних сценаріях має вирішальне значення для забезпечення стійкості та ефективності роботи систем керування.

Несприятливі умови можуть включати в себе дію неконтрольованих зовнішніх збурень або непередбачених чинників, таких як збої при роботі елементів системи. Розглядання цих аспектів має вирішальне значення для забезпечення надійності функціонування БПА.

Детальне вивчення впливу несприятливих умов на роботу систем керування дозволить вдосконалити технології та алгоритми, щоб забезпечити стійкість та ефективність у різноманітних обставинах. Розуміння цих аспектів є ключовим для подальшого розвитку та вдосконалення систем керування і підвищення їхньої здатності працювати в реальних умовах, які можуть бути динамічними та змінюватися.

1.7 Мета і завдання досліджень

Проблема розробки систем автоматичного керування для автономних безпілотних підводних апаратів включає в себе вибір методів реалізації керування і вибір датчиків для отримання первинної інформації. Розвиток сучасних систем управління рухом у тривимірному просторі відбувається в умовах зростання вимог до ефективності досягнення основних цілей, таких як забезпечення бажаної точності параметрів управління рухомими об'єктами. Водночас існують вимоги до підвищення надійності та тривалості функціонування, при умовах жорстких обмежень характеристик енергоефективності.

Проаналізувавши різні системи керування сучасних АБПА, легко дійти висновку, що МЕМС датчики здобули широке визнання та поширення в цій галузі завдяки своїм унікальним характеристикам. Компактні розміри та легка вага МЕМС датчиків сприяють їхньому інтегруванню в обмежений об'єм апарату, не обтяжуючи його структуру. Достатньо висока чутливість та точність цих датчиків роблять їх доречними для вимірювання прискорення, кутової швидкості та інших параметрів, необхідних для ефективного керування рухом АБПА. Більше того, їхні низькі вартість та висока енергоефективність роблять їх привабливими для використання в системах, де обмежені ресурси, що є важливим аспектом у сфері

автономних підводних технологій. Тому розробка та вдосконалення системи керування для забезпечення ефективного функціонування в умовах неконтрольованого впливу фізичних та параметричних збурень є актуальною задачею.

Метою даних досліджень є визначення впливу на динамічні характеристики системи керування АБПА похибок, детермінованих завад, шумів та зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети в кваліфікаційній роботі виконуються такі завдання:

1. Огляд стану проблеми: огляд безпілотних підводних апаратів (БПА), та систем керування їх рухом.
2. Аналіз системи керування кутом курсу БПА, функціональних елементів системи та їх характеристик; обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
3. Розробка програмної моделі системи керування, розробка методики моделювання, проведення моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень.
4. Аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу БПА за наявності неконтрольованих збурень.
5. Обґрунтування шляхів забезпечення показників якості керування кутом курсу, розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення систем керування БПА.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КУТОМ КУРСУ АБПА

У першому розділі була описана велика кількість конфігурацій системи керування АБПА. Деякі апарати спроектовані для виконання тривіальних задач, наприклад, відпрацювання деякого маршруту по наперед заданому плану та збір корисних даних. Існують також системи, здатні самостійно приймати оперативні рішення у відповідь на зміну зовнішніх умов, появу завад або інших чинників, які вимагають від системи керування більш широких можливостей. Основними їх відмінностями є кількість, різноманітність та точність вимірювального обладнання та якість системи керування, яка безпосередньо впливає на можливі сценарії, які може виконувати апарат.

В даному розділі буде приведено опис обраної структурної схеми системи керування АБПА. Обґрунтовано та розглянуто функціональні елементи системи керування, а саме датчики інформації, в ролі яких виступають мікроелектромеханічні системи (МЕМС). А також приведено моделі неконтрольованих збурень, які можуть виникати у такій системі.

2.1 Структурна схема та математична модель системи керування кутом курсу АБПА

Синтез повної математичної моделі руху є достатньо складним та довготривалим. Тому для проведення досліджень було вирішено обрати модель системи керування АБПА тільки за кутом курсу. Дослідження та синтез цієї системи було наведено у роботі [20].

В рамках даної роботи розглядається тільки обертальний рух АБПА, який задається поворотом по вертикальній осі системи координат $OXYZ$, прив'язаної до центра мас апарату, на кут повороту ψ курсу. Даний кут визначається відносно системи координат $Ox_g y_g z_g$, полюс якої теж пов'язаний з центром мас, а осі

відповідно направлені паралельно до меридіану на північ, до паралелі на схід і по місцевій вертикалі.

Структурну схему моделі зображено на рис. 2.1 [20]. На вхід даної системи подається керуючий сигнал ψ_3 , а саме задане значення кута курсу. На виході системи отримуємо кут повороту ψ , який відповідає дійсному значенню повороту апарата.

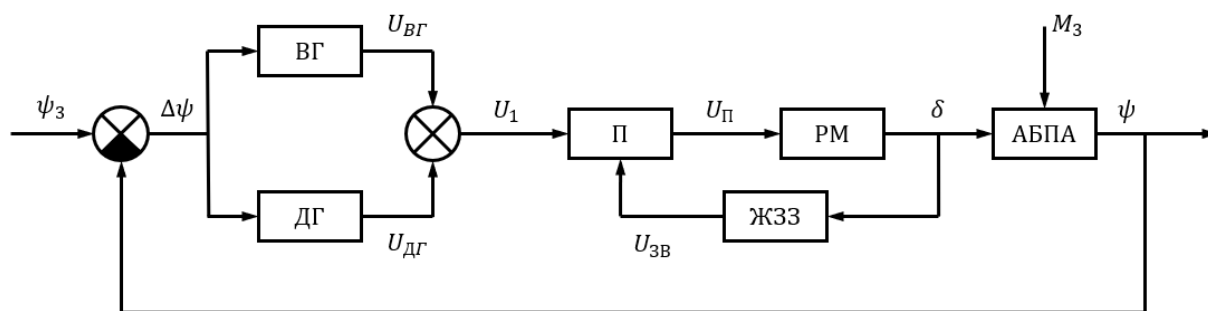


Рисунок 2.1. Структурна схема системи керування

Розглянемо принцип роботи схеми. При зміні кута курсу похибка регулювання $\Delta\psi$ подається на вхід датчика кута (вільний гіроскоп – ВГ) та датчика кутової швидкості (диференціюючий гіроскоп – ДГ). Далі сума значень з датчиків через підсилювач (П) подається на рульову машину (РМ), на виході якої отримуємо значення відхилення рулів керування апаратом δ . Для покращення регулювання рульова машина та підсилювач пов'язані жорстким зворотнім зв'язком (ЖЗЗ). Отримане значення кута відхилення рульової машини передається на об'єкт керування (АБПА) і, враховуючи вплив зовнішнього моменту M_3 на об'єкт, отримуємо на виході значення фактичного кута курсу ψ .

Для кожного елементу системи визначено наступні вихідні сигнали [20]:

Вільний гіроскоп:

$$U_{BG} = k_{BG} \Delta\psi, \quad (2.1)$$

де $\Delta\psi = \psi_3 - \psi$.

Диференціюючий гіроскоп:

$$U_{дг} = k_{дг} \frac{d\Delta\psi}{dt}. \quad (2.2)$$

Підсилювач:

$$U_{\Pi} = k_{\Pi}(U_1 - U_{3B}), \quad (2.3)$$

де $U_1 = U_{BG} + U_{дг}$.

Жорсткий зворотній зв'язок:

$$U_{3B} = k_{3B}\delta. \quad (2.4)$$

Рульова машина:

$$T_{PM} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{d\delta}{dt} = k_{PM} U_{\Pi}. \quad (2.5)$$

АБПА:

$$T_{ABPA} \frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{d\psi}{dt} = k_{ABPA}\delta - k_M M_3. \quad (2.6)$$

Значення коефіцієнтів підібрано з оглядом на те, що об'єктом керування є АБПА класу міні, мікро [20]:

$$\begin{aligned} k_{BG} &= 1 \frac{B}{рад}; & k_{дг} &= 0.5 \frac{B \cdot c}{рад}; & k_{\Pi} &= 20; \\ k_{3B} &= 0.05 \frac{B}{рад}; & T_{PM} &= 0 \text{ c}; & k_{PM} &= 20 \frac{рад}{B \cdot c}; \\ T_{ABPA} &= 2 \text{ c}; & k_{ABPA} &= 1 \text{ c}^{-1}; & k_M &= 1 \frac{рад}{H \cdot м \cdot c}. \end{aligned}$$

За наведеними рівняннями (2.1)-(2.6) визначаємо передатні функції для елементів системи [20].

Вільний гіроскоп:

$$W_{BG}(p) = k_{BG}. \quad (2.7)$$

Диференціюючий гіроскоп:

$$W_{дг}(p) = pk_{дг}. \quad (2.8)$$

Підсилювач:

$$W_{\Pi}(p) = k_{\Pi}. \quad (2.9)$$

Жорсткий зворотній зв'язок:

$$W_{ЖЗЗ}(p) = k_{ЗВ}. \quad (2.10)$$

Рульова машина:

$$W_{PM}(p) = \frac{k_{PM}}{p(T_{PM}p + 1)}. \quad (2.11)$$

Враховуючи, що $T_{PM} = 0$ с :

$$W_{PM}(p) = \frac{k_{PM}}{p}. \quad (2.11)$$

АБПА:

$$W_{АБПА}(p) = \frac{1}{p(T_{АБПА}p + 1)}. \quad (2.12)$$

З визначених передатних функцій (2.7) – (2.12) отримано передатну функцію розімкненої системи:

$$W_{роз}(p) = \frac{k_{роз}(k_{ДГ}p + k_{БГ})}{p(T_{АБПА}p + 1)(T_1p + 1)}, \quad (2.13)$$

$$\text{де } k_{роз} = \frac{1}{k_{ЗВ}}, \quad T_1 = \frac{1}{k_{П}k_{PM}k_{ЗВ}}.$$

Підставивши у формулу (2.13) значення коефіцієнтів отримаємо наступний вираз:

$$W_{роз}(p) = \frac{20(0.5p + 1)}{p(2p + 1)(0.05p + 1)}. \quad (2.14)$$

Однією з найважливіших вимог до систем керування є стійкість. Тому в роботі [20] дану систему було перевірено за критерієм Гурвіца. Визначені коефіцієнти характеристичного полінома та значення діагональних мінорів є більшими за нуль. Для оцінки запасів стійкості побудовано графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ системи (рис.2.2).

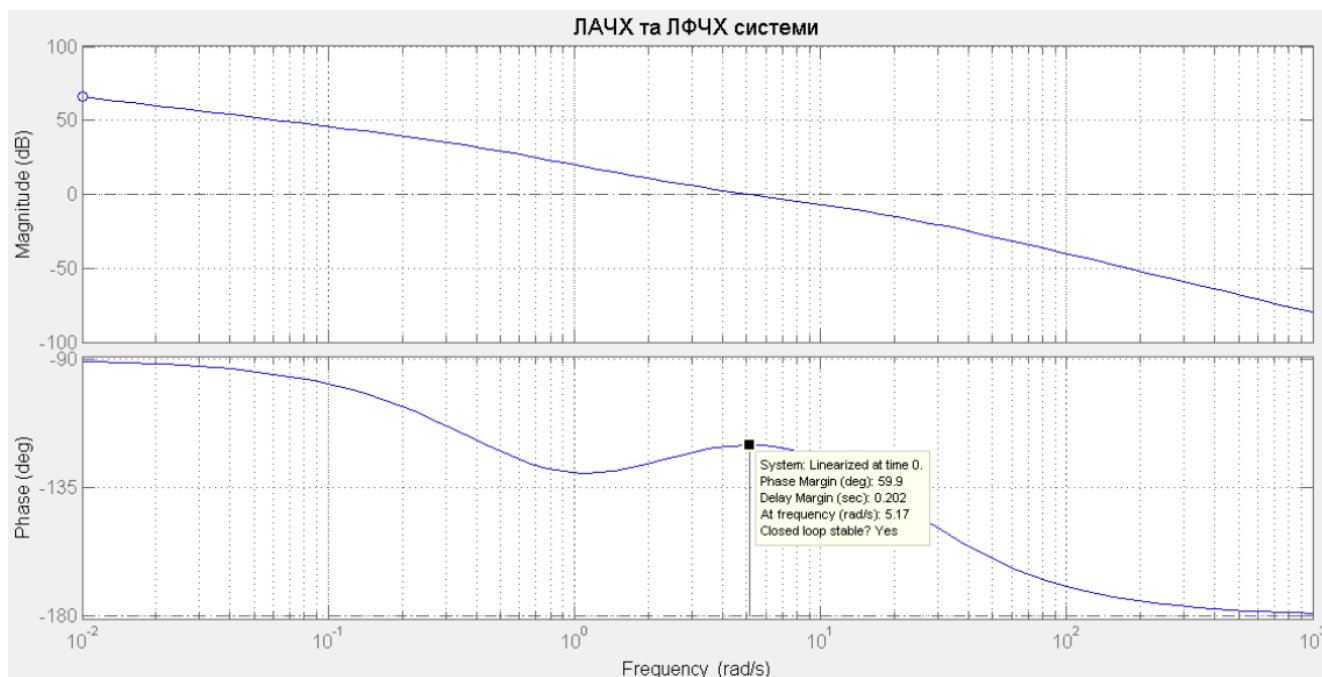


Рисунок 2.2. Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи [20]

Оскільки графік фазочастотної характеристики не перетинає відмітки 180 градусів, система є стійкою по амплітуді. Запас стійкості по фазі становить 59.9 градусів. Він визначається відстанню до відмітки -180 градусів на графіку ЛФЧХ на частоті, яка відповідає значенню амплітуди на графіку ЛАЧХ в місці її перетину з нулем.

2.2 Аналіз функціональних елементів системи та їх характеристик

У запропонованій моделі є ланки, які відповідають реальним елементам системи керування. За вимірювання кута повороту та кутової швидкості відповідають вільний (ВГ) та диференціюючий гіроскопи (ДГ). В моделі вони представлені у вигляді ідеальних ланок, тобто таких, які працюють без похибок та не вносять у роботу системи ніяких неконтрольованих впливів. Існуючі датчики інформації не можуть мати таких характеристик. Тому для оцінки роботи системи в умовах, які є більш наближеними до реальних, варто провести уточнення параметрів моделі. Суть уточнення полягатиме у впровадженні у модель шкідливих впливів детермінованих завад, похибок та шумів, які можуть виникати у реальній системі. Варто зазначити, що деякі дослідження в цьому напрямку вже описані у

статті [21], але в ній не було якісно обґрунтовано характеристики та природа промодельованих впливів.

Для початку слід визначити які саме датчики будуть моделюватись. У першому розділі було описано, що на теперішній час в дуже багатьох дослідженнях пропонується використовувати у системах керування мікроелектромеханічні датчики (MEMS). Такий вибір можна пояснити їх якісними перевагами: надзвичайно низька вартість, висока надійність і гранично малі габарити [9]. Проте, незважаючи на їх широке розповсюдження та розвиток MEMS технологій, дані пристрої не можуть повністю задовольнити вимоги у системах, де потрібна дуже висока точність. Негативні ефекти цих датчиків проявляються у нестабільності зміщення нуля, нелінійності та поганої стійкості до температурних впливів [22].

MEMS датчики та актуатори — це пристрої, які мають статичні або рухомі компоненти, розміри яких вимірюються в масштабах мікрометра. Мікроелектромеханічні системи зазвичай поєднують електронні, механічні, оптичні, магнітні чи інші компоненти в одній мікросхемі [23].

Як вже було зазначено, такі датчики обов'язково генерують шум під час роботи. Джерелами цих шумів можуть бути як зовнішні чинники так і внутрішні. Зовнішні чинники можуть бути спричинені впливом електромагнітного поля, температурними змінами та вібраціями [9]. Разом вони можуть суттєво впливати на сигнал з датчика, але їх дії можна контролювати ззовні, шляхом використання спеціальних стендів під час проведення досліджень.

Внутрішніми джерелами загалом є електронний шум схеми, що перетворює рух на сигнал напруги (джонсонівський тепловий шум, дробовий шум і т.д.), та тепловий механічний (броунівський, обумовлений наявністю дрібних рухомих частин) від самого датчика. У великих системах такі шуми часто є незначними. Проте у міру зменшення розмірів систем сигнали мають тенденцію до зменшення, а величина шуму при цьому має тенденцію до збільшення у відносному масштабі. Разом це має подвійний ефект на співвідношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR). Тому практичні обмеження мінімальних меж чутливості MEMS датчиків встановлюються рівнями шуму [23].

2.2.1 Мікромеханічні акселерометри

Серед різноманітних MEMS пристроїв акселерометр є найчастіше використовуваним у різних системах. Він використовує пробну масу, відому як інерційна маса (ІМ), для вимірювання сили, що діє на нього. Простий одноосьовий акселерометр показаний на рис. 2.3. На цій схемі позначені: 1 – корпус, 2 – демпфуюче середовище, 3 – інерційна маса, 4,5 – пружний підвіс, вісь x – вісь чутливості. Інерційна маса з'єднана з корпусом за допомогою пружного підвісу. Конструктивний вузол, який включає в себе ІМ і підвіс з елементами кріплення, називають чутливим елементом (ЧЕ) акселерометра. Коли корпус приладу піддається прискоренню, інерційна маса прагне чинити опір і в результаті зміщується відносно тіла корпусу [9].

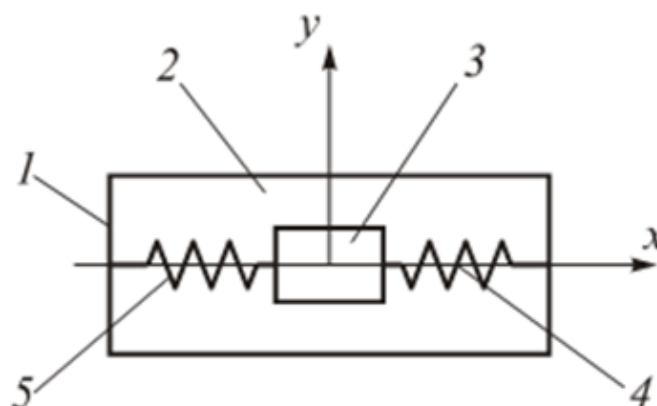


Рис. 2.3 Схема одноосьового акселерометру

Вимірювання відстані між корпусом та інерційною масою дозволяє розрахувати прискорення. Важливо зауважити про вплив сили тяжіння на цю систему. Система пружинного підвісу вимірює силу, яка діє на чутливий елемент, а не просто прискорення. Це призводить до появи на виході датчика постійного прискорення $9.81 \frac{m}{c^2}$ у напрямку осі чутливості, за умови узгодженості з напрямком дії сили тяжіння. Завдяки цій властивості можна визначити кут між віссю чутливості датчика та місцевою вертикаллю.

Один із найпопулярніших методів вимірювання переміщення в MEMS-акселерометрі базований на конденсаторному принципі. Інерційна маса являє собою одну з пластин конденсатора, тоді як закріплені на корпусі гребінчасті пальці діють як інша пластина конденсатора. Відповідно вимірювання зміни ємності дає змогу визначити прискорення [24].

Для вибору датчика, який би відповідав вимогам до СК, а також визначення параметрів моделі, важливо визначити основні характеристики акселерометрів, які приводять виробники.

Чутливість MEMC акселерометрів

Чутливість акселерометра визначає швидкість перетворення механічної енергії в електричний сигнал (вихід). Саме це визначить діапазон вимірюваних прискорень акселерометром. В документації на цифрові MEMC акселерометри це значення вказують як LSB/g (least significant bit – величина молодшого значущого біта на g), де g — прискорення сили тяжіння. Чутливість акселерометра з аналоговим виходом зазвичай вказується в mV/g. Бажана чутливість залежить від рівня сигналу, який необхідно отримати. Якщо планується вимірювати невеликі вібрації, то для забезпечення чистішого сигналу (вище співвідношення сигнал/шум, SNR) буде бажаною вища чутливість [25].

Діапазон вимірювання MEMC акселерометрів

Ця характеристика визначає діапазон амплітуди прискорення, яку може вимірювати датчик. Зазвичай виражається в $\pm g$. Акселерометр із цифровим виходом зазвичай забезпечує кілька різних діапазонів вимірювання. Тобто він має декілька режимів роботи, наприклад $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$. Причому, діапазон вимірювання та характеристики чутливості пов'язані один з одним. Чутливість цифрового акселерометра зменшується, коли ми програмуємо пристрій для роботи в більшому діапазоні вимірювань [25].

Шум MEMC акселерометрів

Вихідний сигнал акселерометра зазнає впливу двох різних типів шуму: термомеханічний шум рухомих частин і електронний шум, що створюється в схемі

формування сигналу акселерометра. Рівень шуму можна визначити різними способами. Специфікації датчиків характеризують загальну шумову характеристику акселерометра, надаючи спектральну щільність потужності шуму (power spectral density, PSD) у $\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$ або $\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$. Якщо помножити це значення на квадратний корінь смуги пропускання (Bandwidth [Hz] - діапазон частот, у якому датчик виявляє рух та видає дійсний вихідний сигнал [26]), то в результаті можна отримати середнє квадратичне значення шуму (root mean square, RMS) з одиницями μV або μg .

$$RMS\ Noise = Noise\ Density \times \sqrt{Bandwidth} \quad (2.15)$$

Відповідно прискорення, які будуть нижче рівня RMS шуму, не можуть бути виміряні датчиком [25].

2.2.2 Мікромеханічні гіроскопи

Зазвичай для недорогих систем керування використовують мікромеханічні гіроскопи (ММГ) в якості датчика кутової швидкості. ММГ призначені для вимірювання кутової швидкості і представляють собою інтегрований пристрій з розмірами в декілька міліметрів, який складається з механічного чутливого елемента і електронних систем управління.

Існує два основних типи ММГ: роторні і осциляторні вібраційні гіроскопи. Цей поділ базується на характері первинного руху чутливого елемента. Принцип роботи ММГ полягає в створенні відносно корпусу знакозмінного поступального або обертального руху чутливого елемента, який вимірюється при переміщенні по іншому ступеню свободи. Це відбувається під дією коріолісових сил або гіроскопічних моментів при наявності переносної кутової швидкості корпусу [9].

Найпоширенішою конструктивною схемою ММГ є камертонний гіроскоп (рис. 2.4), в якій чутливим елементом виступають дві пробні маси m , пов'язані між собою пружним елементом. Частинки приводяться в протифазний коливальний рух із швидкістю V у площині XZ . Це збудження здійснюється внутрішнім

генератором. При обертанні основи з кутовою швидкістю ω навколо осі чутливості Z на кожному з елементів m через дію ефекту Кориоліса F з'являється прискорення, яка буде спричиняти їх зміщення у площині YZ . Це зміщення несе в собі інформацію про кутову швидкість обертання основи. Для збудження чутливого елементу та отримання з нього корисної інформації можуть використовуватись п'єзоелектричні, п'єзорезистивні або конденсаторні механічні принципи [22, 27].

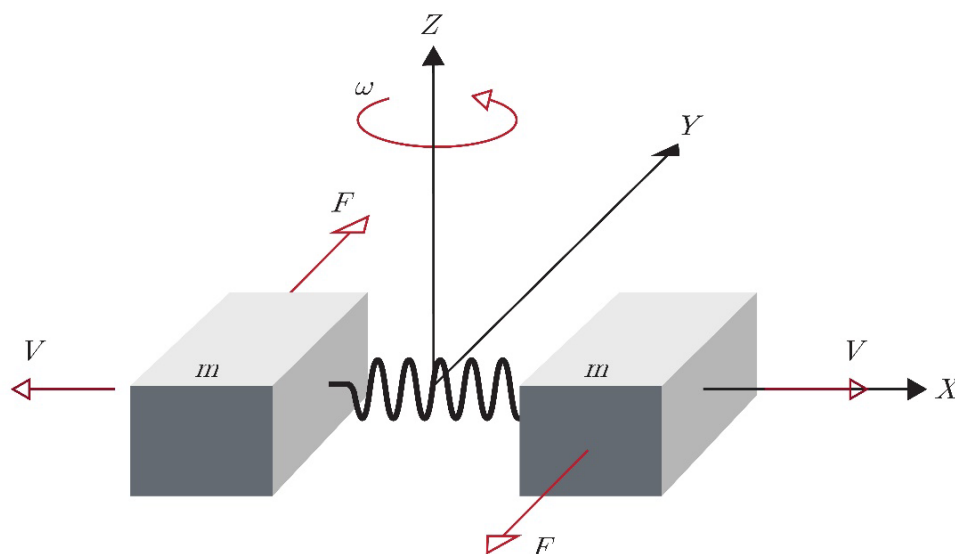


Рис. 2.4 Схема камертонного ММГ [22]

Щодо точності, важливо відзначити, що випадковий дрейф ММГ може становити від $0,001$ $^{\circ}/\text{год}$, що ставить їх точність в один ряд із прецизійними волоконно-опричними гіроскопами та кільцевими лазерними гіроскопами. Проте такий рівень точності можливий лише у виключних випадках. Більшість ММГ мають випадковий дрейф нуля від 10000 $^{\circ}/\text{год}$ до $0,01$ $^{\circ}/\text{год}$ у залежності від рівня виконання і призначення [9].

Для проведення якісного моделювання МЕМС гіроскопів у системі керування, необхідно розглянути найпоширеніші похибки та шуми цього інерційного датчика, а також їхній вплив на вихідний сигнал.

Ці характеристики визначаються наступними параметрами: нестабільність нуля, випадкове блукання кута, шум квантування, випадкове блукання швидкості та тренд.

Щільність шуму

Усереднення шумового сигналу та його виведення з нижчою швидкістю, відоме як зменшення дискретизації, зменшує вимірний шум вихідного сигналу датчика. Одного стандартного відхилення шуму недостатньо для належної характеристики внутрішнього шуму датчика, в документації можуть вказувати це стандартне відхилення при певній частоті дискретизації, однак більш поширеним показником є щільність шуму (noise density, ND), яка визначає амплітуду шуму, поділену на квадратний корінь із частоти дискретизації [24]. Щільність шуму гіроскопа можна представити як $\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$. Помноживши щільність шуму на квадратний корінь із частоти дискретизації (sample rate, SR), можна отримати стандартне відхилення $\sigma = ND\sqrt{SR}$. Крім того, іноді щільність шуму визначається як спектральна щільність потужності (PSD), яка є квадратом щільності шуму. Для гіроскопів це значення дає одиниці $\frac{(^{\circ}/s)^2}{Hz}$ [24].

Нестабільність нуля

Нестабільність нуля (bias instability або bias stability) визначається як відхилення або дрейф датчика від його середнього значення вихідної кутової швидкості. Це значення показує, наскільки стабільним є зміщення нуля датчика протягом певного періоду. Нижчі значення є перевагою, оскільки це призводить до того, що датчик виробляє менше відхилень від середнього значення з часом. Цей ефект впливає як на гіроскопи, так і на акселерометри. Зв'язок величини спектральної щільності потужності $S_{\Omega}(f)$ з цим шумом показано в рівнянні (2.15) [24, 28].

$$S_{\Omega}(f) = \begin{cases} \frac{B^2}{2\pi} \frac{1}{f}, & f \leq f_0, \\ 0, & f > f_0 \end{cases}, \quad (2.16)$$

де B — параметр нестабільності нуля, а f_0 — частота зрізу.

Слід також відзначити про такий параметр як відтворюваність нестабільності нуля при включенні (turn-on bias stability). Коли датчик запускається, виникає початкове зміщення, значення якого може коливатися від одного ввімкнення до наступного через непостійність температурних, фізичних, механічних та електричних впливів між вимірюваннями. Відповідно, цей параметр характеризує повторюваність зміщення нуля за постійних умов протягом терміну служби датчика. Вимірюється у $^{\circ}/s$. Ця зміна не може бути відкалібрована під час виробництва, однак її можна оцінити в системі після кожного запуску [21, 28].

Також на нестабільність нуля впливає температура, при якій працює датчик. Це явище називають чутливістю зміщення до температури (bias temperature sensitivity). Воно піддається калібруванню після проведення необхідних вимірювань в бажаному діапазоні температур, однак, його можна виміряти лише в межах нестабільності нуля [29].

Випадкове блукання кута

Випадкове блукання кута (angular random walk, ARW) — це міра шуму (також відома як випадковий шум, випадковий дрейф гіроскопа) у вихідному сигналі гіроскопа з одиницями вимірювання $\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$. Вона виникає в результаті інтегрування вихідного сигналу стаціонарної швидкості гіроскопа в часі. Для стаціонарного гіроскопа ідеальне вихідне значення має дорівнювати нулю. Випадкове блукання кута описує середнє відхилення або помилку, яка виникне в результаті дії цього шумового елементу [22, 28].

Рівняння (2.17) описує зв'язок спектральної щільності шуму з випадковим блуканням кута [23].

$$S_{\Omega}(f) = N^2, \quad (2.17)$$

де N — це параметр випадкового блукання кута, що визначає вихідний шум як функцію смуги пропускання датчика.

Випадкове блукання швидкості

Випадкове блукання швидкості (rate random walk, RRW) — це компонент шуму у вихідному сигналі швидкості гіроскопа через накопичені помилки в механічній динаміці датчика. Ця складова має дуже малий коефіцієнт і її неможливо видалити за допомогою класичної фільтрації на платі датчика [28]. Значення RRW задається у $^{\circ}/s\sqrt{Hz}$.

Значення спектральної щільності шуму також визначається випадковим блуканням швидкості [23].

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{f^2}, \quad (2.18)$$

де K — параметр випадкового блукання швидкості.

Шум квантування

Шум квантування (quantization noise) вводиться в аналоговий сигнал в результаті його перетворення в цифрову форму. Він спричинений невеликими відмінностями між амплітудами точок, що відбираються, і цифровою роздільною здатністю аналого-цифрового перетворювача (АЦП) [22].

Спектральну щільність шуму кута можна записати наступним чином:

$$S_{\theta}(f) = \begin{cases} \tau_0 Q^2 \frac{\sin^2(\pi f \tau_0)}{(\pi f \tau_0)^2} \\ \approx \tau_0 Q^2, & f < \frac{1}{2\tau_0} \end{cases}, \quad (2.19)$$

де Q — параметр шуму квантування, а τ — інтервал вибірки.

Теоретично межа для Q становить $S/\sqrt{12}$, де S — коефіцієнт масштабування гіроскопа для тестів з рівномірним і фіксованим часом вибірки. Спектральна щільність кутової швидкості пов'язана з $S_{\theta}(f)$ через рівняння:

$$S_{\Omega}(2\pi f) = (2\pi f)^2 S_{\theta}(2\pi f), \quad (2.20)$$

звідки:

$$S_{\Omega}(f) = \begin{cases} \frac{4Q^2}{\tau_0^2} \sin^2(\pi f \tau_0) \\ \approx (2\pi f)^2 \tau_0 Q^2, & f < \frac{1}{2\tau_0} \end{cases}. \quad (2.21)$$

Тренд

Упродовж великих часових інтервалів на отриманих даних може з'являтися дуже повільна монотонна зміна інтенсивності сигналу гіроскопа, яка зберігається протягом тривалого періоду часу. Це може бути пов'язано з дуже малим постійним прискоренням платформи, яке впливає на вихідний сигнал. Цей вплив Ω називають трендом (rate ramp). Його можна описати як вхідні дані для гіроскопа [22]:

$$\Omega = Rt, \quad (2.22)$$

де R – коефіцієнт тренду.

Спектральна щільність для цього шуму визначається наступним чином:

$$S_{\Omega}(f) = \frac{R^2}{(2\pi f)^3}. \quad (2.23)$$

Чутливість ММГ

Чутливість ММГ визначає співвідношення між кутовою швидкістю на вході датчика в градусах за секунду і зміною значення напруги на виході гіроскопа. Для цифрового гіроскопа це значення задають у $\frac{LSB}{^\circ/s}$, для аналогового $\frac{mV}{^\circ/s}$. Чутливість пристрою може змінюватися через багато факторів, оскільки вихідний сигнал може бути чутливим до умов навколишнього середовища та інших небажаних вхідних даних. Чутливість можна використовувати для перетворення сигналу вихідної напруги гіроскопа в кутову швидкість [28].

$$S_f = \frac{\omega + \omega_0}{\hat{\omega}}, \quad (2.24)$$

де S_f - чутливість, ω - дійсна кутова швидкість, ω_0 - зміщення нуля, $\hat{\omega}$ - вихідний сигнал.

2.3 Обґрунтування моделей потенційних параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень

Для отримання достовірних результатів дослідження впливу на запропоновану систему керування БПА потенційних неконтрольованих збурень необхідно визначити їх параметри та методи інтеграції в модель. Вище було розглянуто, що в системі керування повинні використовуватися МЕМС датчики, а саме акселерометр та гіроскоп. І, як вже зазначалось, основним недоліком таких пристроїв є значні похибки, які обов'язково супроводжують їх відповідні вимірювання. Тому наступним кроком буде визначення шумових характеристик датчиків.

2.3.1 Варіації Аллана

Останнім часом метод варіацій (дисперсій) Аллана широко використовується для визначення складових шуму вимірювань мікромеханічних систем. Цей метод представляє випадкову похибку дрейфу дисперсії від часу осереднення [30, 31]. Метод варіацій Аллана можна використовувати для визначення характеристик базових випадкових процесів, які викликають шум даних. Отримана характеристична крива методу дає систематичну характеристику різних випадкових похибок, що містяться у вихідних даних інерційного датчика.

Припустимо, що в результаті вимірювань отримано N послідовних точок даних, кожна з яких має час вибірки t_0 . Розіб'ємо вхідні дані на кластери з n послідовних точок даних, як показано на рис. 2.5. При чому має виконуватись

$$\text{умова } n < \frac{N}{2}.$$

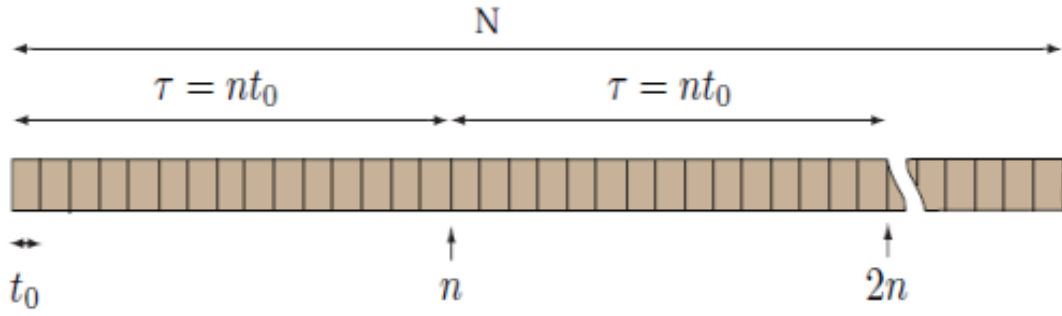


Рисунок 2.5. Структура даних методу варіацій Аллана [30]

З кожним кластером пов'язаний час τ , який дорівнює nt_0 . Якщо миттєве вихідне значення інерційного датчика дорівнює $\Omega(t)$, то середнє значення кластера визначається як [30]:

$$\bar{\Omega}_k(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+\tau} \Omega(t) dt, \quad (2.25)$$

де $\bar{\Omega}_k(\tau)$ представляє середнє значення вихідної величини для кластера, який починається з k -ї точки даних і містить n точок даних. Кожне наступне значення кластерного середнього визначається як:

$$\bar{\Omega}_{next}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+\tau} \Omega(t) dt, \quad (2.26)$$

де $t_{k+1} = t_k + T$.

Отже, варіація Аллана довжини τ визначається як [30]

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} \left[\bar{\Omega}_{next}(\tau) - \bar{\Omega}_k(\tau) \right]^2, \quad (2.27)$$

Очевидно, що для будь-якої кінцевої кількості точок даних N можна сформувати кінцеву кількість кластерів фіксованої довжини τ . Фактично, обчислення варіації Аллана $\sigma^2(\tau)$ полягає у визначенні дисперсії різниці між середніми значеннями двох сусідніх кластерів. Вона є мірою стабільності вихідного сигналу датчика [30].

В той же час існує однозначний зв'язок між варіацією Аллана та класичними характеристиками випадкового процесу в частотній області виду:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\Omega(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (2.28)$$

де $S_\Omega(f)$ - спектральна щільність вимірюваного випадкового процесу $\Omega(t)$.

Виходячи з відомих для інерціальних вимірювачів (гіроскопів, акселерометрів) основних фізичних причин виникнення шумових складових і відповідних конкретних виразів для спектральної щільності, вираз для варіації Аллана $\sigma^2(\tau)$ можна апроксимувати наступним чином [31]:

$$\sigma^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \quad (2.29)$$

де R , K , B , N , Q – коефіцієнти випадкової вимірюваної величини, які мають наступний зміст:

- R – квазідетермінована зміна вхідної величини (тренд);
- K – випадкове блукання швидкості;
- B – нестабільність зміщення нуля;
- N – випадкове блукання кута;
- Q – квантування вихідного сигналу.

Для аналізу варіації Аллана $\sigma(\tau)$ від часу кореляції τ і кількісної оцінки окремих складових зазвичай використовується побудований в логарифмічному масштабі графік виміру квадратного кореня $\sigma(\tau) = \sqrt{\sigma^2(\tau)}$ від інтервалу кореляції τ . Для визначення параметрів окремих шумових складових на графіку варіації Аллана будуються асимптоти, нахили яких визначаються виразом (2.29). Кожна асимптота буде характеризувати свою шумову складову. Типовий графік варіації Аллана зображено на рис. 2.6 [31].

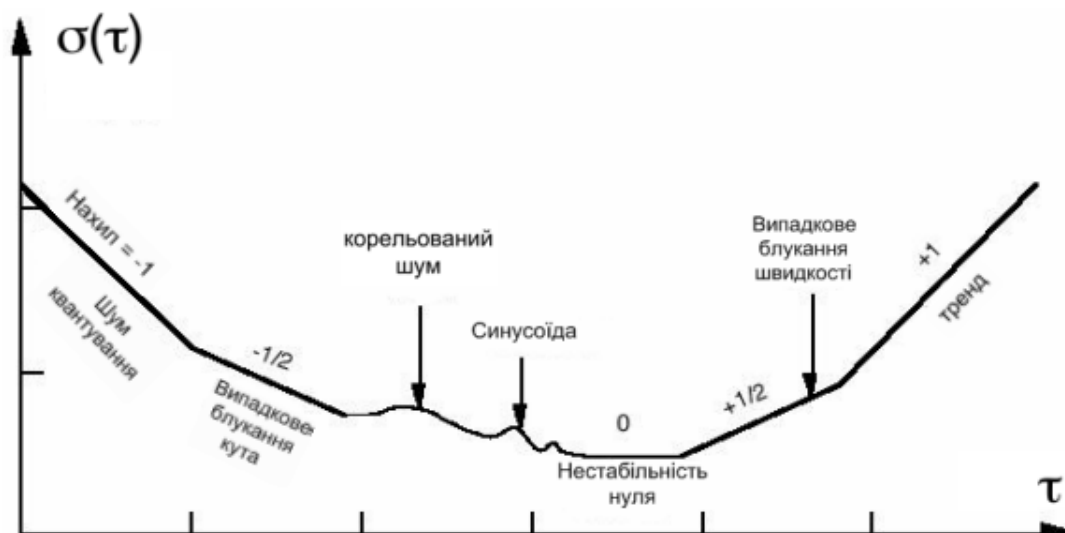


Рисунок 2.6. Характерні нахили графіка варіації Аллана [31]

Методика визначення параметрів шумових складових на графіку полягає у визначенні середнього квадратичного відхилення $\sigma(\tau)$ на відповідній асимптоті та часі осереднення τ , які можна виразити з рівняння (2.29) [30, 31]:

1. Шум від квантування АЦП по Аллану $\sigma(\tau) = Q \frac{\sqrt{3}}{\tau}$ визначається як значення асимптоти з нахилом «-1» в точці $\tau = \sqrt{3} c$ на осі абсцис.

2. Випадкове блукання кута по Аллану $\sigma(\tau) = N \frac{1}{\sqrt{\tau}}$ визначається як значення асимптоти з нахилом «-1/2» при $\tau = 1 c$.

3. Нестабільність нуля по Аллану $\sigma(\tau) = B \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} \approx 0.664 B$ визначається як значення дотичної з нахилом «0» в мінімальному значенні графіка варіації Аллана. Це значення необхідно розділити на 0.664.

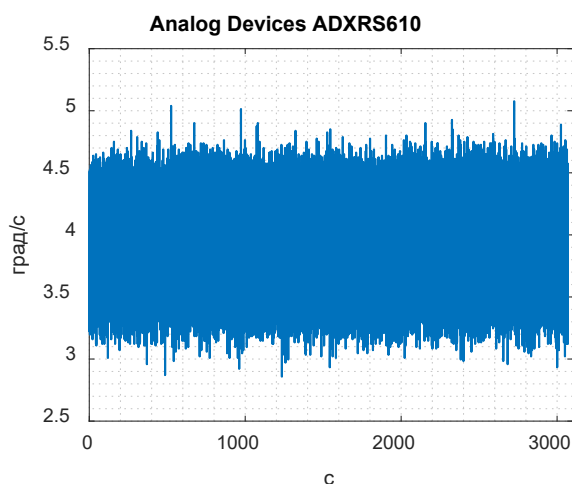
4. Випадкове блукання швидкості по Аллану $\sigma(\tau) = K \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{3}}$ визначається як значення асимптоти з нахилом «+1/2» при $\tau = 3 c$.

5. Тренд по Аллану $\sigma(\tau) = R \frac{\tau}{\sqrt{2}}$ визначається як значення асимптоти з нахилом «+1/2» при $\tau = \sqrt{2} \text{ с}$.

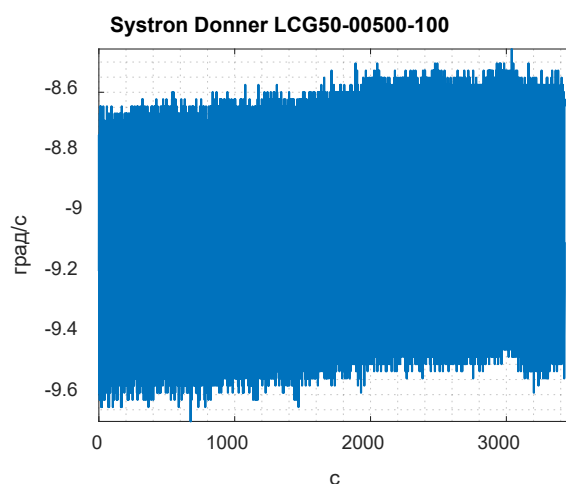
2.3.2 Визначення шумових характеристик ММГ методом варіацій Аллана

Отримання експериментальних даних дозволить провести моделювання в умовах, більше наближених до реальних. Для цього було проведено дослідження з визначення шумових характеристик гіроскопів Analog Devices ADXRS610 та Systron Donner LCG50-00500-100. Відповідно маємо дві експериментальні вибірки даних:

1. Статичний тест Analog Devices ADXRS610 протягом 51 хв з частотою отримання даних 100 Гц в умовах закритого приміщення при температурі навколишнього середовища (рис. 2.7, а);
2. Статичний тест Systron Donner LCG50-00500-100 протягом 58 хв з частотою отримання даних 100 Гц в умовах закритого приміщення при температурі навколишнього середовища (рис. 2.7, б).



(а)



(б)

Рисунок 2.7. Вибірki експериментальних даних з датчиків: а) Analog Devices ADXRS610; б) Systron Donner LCG50-00500-100

Далі з цих вибірок побудовано графіки варіації Аллана (рис. 2.8, рис. 2.9) та визначено параметри шуму для кожного з датчиків. Результати вимірювань наведено у табл. 2.1.

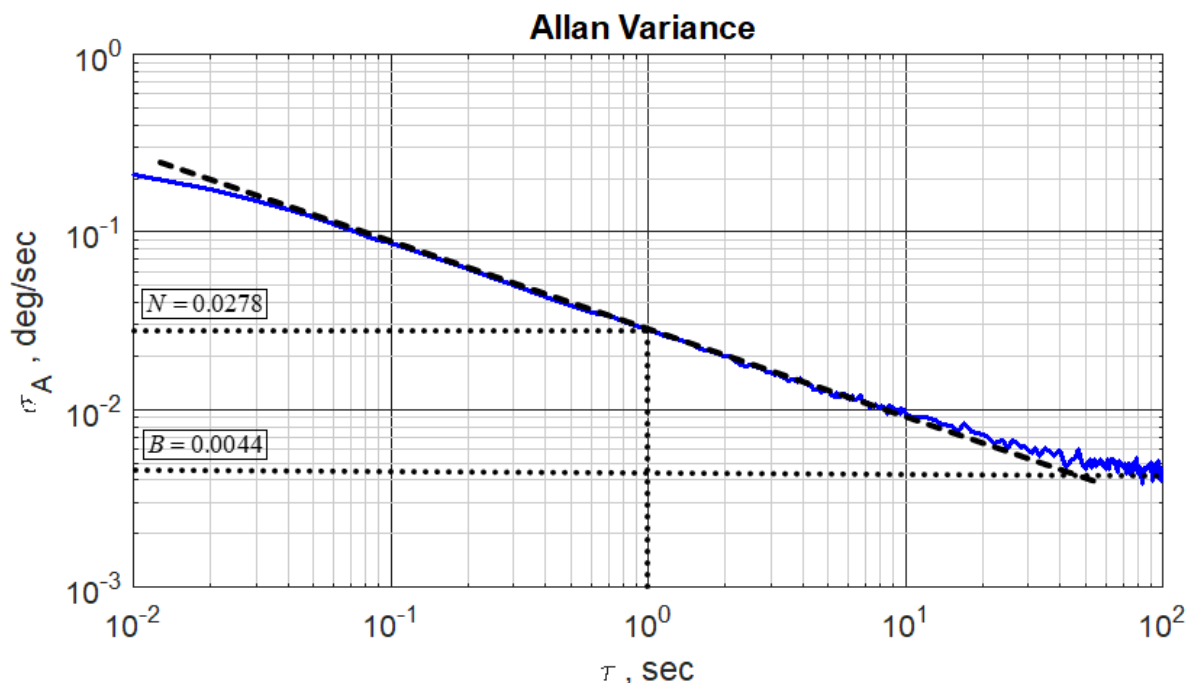


Рисунок 2.8. Визначення шумових складових гіроскопа ADXRS610 на графіку варіації Аллана

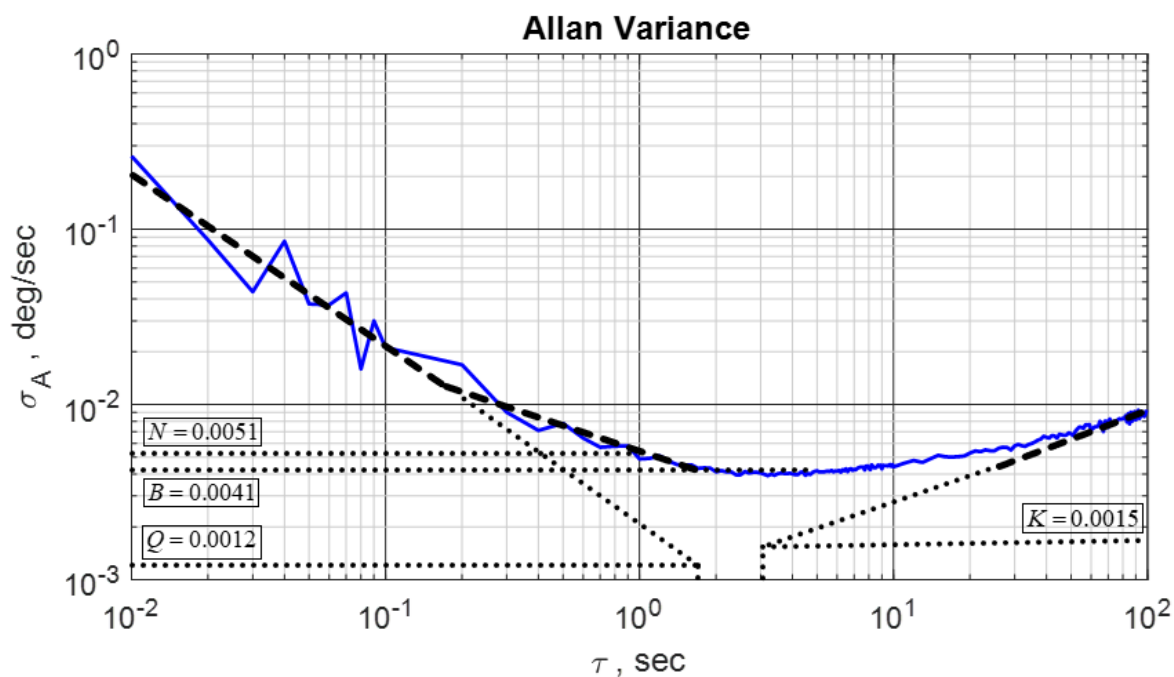


Рисунок 2.9. Визначення шумових складових гіроскопа LCG50-00500-100 на графіку варіації Аллана

Таблиця 2.1. Визначені шумові характеристики МЕМС ДКІШ

	Analog Devices ADXRS610	Systron Donner LCG50-00500-100
Шум квантування Q, <i>град</i>	-	0.0012
Випадкове блукання кута N, $\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$	0.0278	0.0051
Нестабільність нуля B, $^{\circ}/s$	0.0044	0.0062
Випадкове блукання швидкості K, $^{\circ}/s \sqrt{Hz}$	-	0.0015

Обидва з представлених датчиків відносяться до пристроїв дешевої категорії, призначених для використання у системах, де необхідна універсальність монтажу, низька ціна за одиницю, важлива стійкість до умов навколишнього середовища (системи стабілізації, ІВМ, датчики перекидання і т.п.). У відповідній документації приводяться наступні характеристики:

ADXRS610 [32]: Measurement Range $\pm 300^{\circ}/s$; Noise Density $0.05 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$;

LCG50-00500-100 [33]: Measurement Range $\pm 500^{\circ}/s$; Noise Density $0.01 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$.

Очевидно, що LCG50-00500-100 має кращі характеристики по точності. Порівнявши результати вимірювань можна дійти того ж висновку. Хоча у ADXRS610 відсутні складові шуму квантування та випадкового блукання швидкості, видно що випадкове блукання кута ($0.0278 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$) приблизно у 5 разів більше, ніж відповідне значення у LCG50-00500-100 ($0.0051 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$). Що відповідає заявленим характеристикам.

Ці результати будуть використані при проведенні моделювань системи.

2.3.3 Моделі потенційних неконтрольованих збурень

Визначення рівня шуму датчиків інформації в системі керування є досить важливим, оскільки він напряму впливає на якість роботи системи. Неможливо

точно виміряти малі значення прискорення або кутової швидкості, якщо вони менше рівня шуму. Для зниження порогу чутливості застосовують осереднення вихідних сигналів датчиків або застосовують спеціальні фільтри. Недоліком і осереднення, і фільтрування є запізнювання, які вони вносять, що впливає на швидкодію системи [31].

Для визначення шумових характеристик МЕМС пристроїв виробники у технічній документації приводять параметр середнього квадратичного амплітуди шуму (RMS), одиниці вимірювання якого, в залежності від типу датчика, становлять LSB_{RMS} , $^{\circ}/s_{RMS}$, μg_{RMS} . При чому обов'язково вказується смуга пропускання (bandwidth), на якій визначалось значення RMS. Також вказують параметр спектральної щільності шуму (noise power spectral density). Його ще називають інтенсивністю шуму. Для гіроскопів одиниця вимірювання інтенсивності $\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$, для акселерометрів - $\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$.

Моделювання випадкових збурень зі складним спектром можна виконати з використанням інструменту формуючих фільтрів. Для математичного опису сигналу використовують кореляційні функції виду:

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\mu|\tau|}, \quad (2.30)$$

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\mu|\tau|} (b \cos 2\pi f_0 \tau + c \sin 2\pi f_0 |\tau|), \quad (2.31)$$

де σ - середньоквадратичне відхилення, μ - коефіцієнт затухання, τ - змінний по величині від 0 да заданої границі здвиг копії сигналу відносно оригіналу; f_0 - частота гармонічної складової сигналу ($2\pi f_0 = \omega_0$ - кругова частота).

Тоді для кореляційної функції (2.30) формуючий фільтр матиме вигляд диференційного рівняння 1-го порядку

$$\dot{\varepsilon} + \mu\varepsilon = \sigma\sqrt{2\mu}w(t), \quad (2.32)$$

де ε - значення моделі сигналу, $w(t)$ - модельований «білий шум» з нормальним розподілом інтенсивності (сигнал змінює своє значення в межах $\pm 3\sigma$).

Для кореляційної функції (2.31) формуючий фільтр матиме вигляд диференційного рівняння 2-го порядку

$$\dot{\varepsilon} + 2\mu\varepsilon + d^2\varepsilon = 2d\sigma\sqrt{2\mu}w(t), \quad (2.32)$$

де $d^2 = b^2 + c^2$.

Правильність підбору кореляційної функції та їх параметрів слугує міра відповідності змодельованого випадкового процесу з його оригіналом.

Підбір та визначення параметрів кореляційної функції є достатньо складним та потребує більш точних експериментальних даних. Тому при дослідженні характеристик шуму його часто апроксимують білим шумом з постійною інтенсивністю $S = const$ [32]. Оскільки вільне блукання кута характеризується коренем квадратним з інтенсивності $N = \sqrt{S}$, таке наближення буде доцільним.

Отже, в якості параметрів білого шуму буде задаватися спектральна щільність S . Її можна визначити з специфікації датчика або з отриманого значення вільного блукання кута N . Час кореляції білого шуму буде визначатись по ширині пропускання датчика.

При проведенні моделювання системи керування АБПА не менш важливим буде визначити вплив на неї зовнішніх неконтрольованих збурень, які можуть виникати у процесі роботи системи. Модель системи керування можна піддати впливу зовнішнього моменту, який буде негативно впливати на якість керування. Природу цих впливів можна пояснити, наприклад, дією бокової хвилі, коли апарат пересувається близько до поверхні води. Тоді зовнішній момент можна подати у вигляді синусоїди. Також можна промодельовати поведінку системи керування у випадку дії на неї вибухової хвилі. Цей вплив можна подати у вигляді короткочасного згасаючого моменту з дуже високою амплітудою.

Математично його можна описати у вигляді функції

$$M_3(t) = Ae^{-kt} \sin \omega t, \quad (2.33)$$

де A - амплітуда зовнішнього моменту, k - коефіцієнт згасання, ω - частота коливань.

Ще одним негативним сценарієм для АБПА може бути зіткнення з якимось об'єктом. Таке ударне навантаження задають коротким одиничним стрибкоподібним сигналом.

Подібне дослідження дасть можливість провести більш комплексний аналіз системи керування.

2.4 Моделювання параметричних та зовнішніх збурень

Вище було розглянуто потенційні шкідливі збурення, які можуть виникати під час роботи системи керування. Було запропоновано використати білий шум у якості математичного опису шумів, які генерують MEMC датчики у реальних системах. Також виокремлено різні негативні сценарії використання АБПА, в яких на нього будуть впливати неконтрольовані зовнішні збурення. Їх дію описано впливом зовнішнього моменту на АБПА.

Для подальшого дослідження слід створити моделі цих збурень та визначити їх параметри. Відповідно до цього у програмному середовищі MATLAB/Simulink було проведено моделювання цих вихідних сигналів.

Шум

Після огляду та проведення дослідження шумових складових MEMC датчиків в якості апроксимації було вирішено використати білий шум. В Simulink для цього використовується блок - генератор білого шуму Band-Limited White Noise. Він дозволяє імітувати ефект білого шуму з часом кореляції, набагато меншим за найкоротшу постійну часу системи. Реалізація моделі білого шуму та її параметри показані на рис. 2.10.

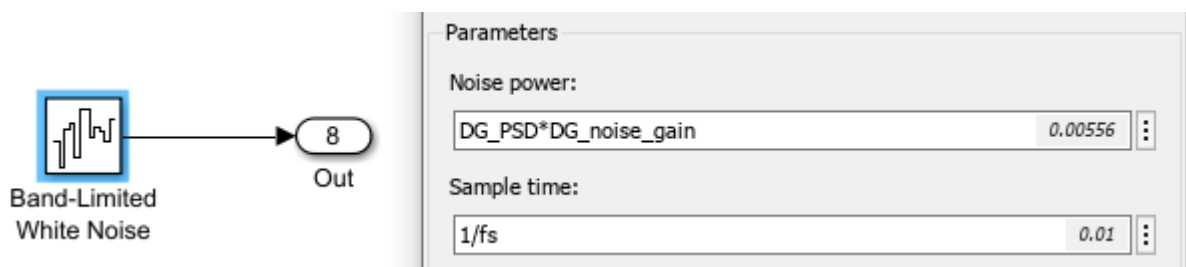


Рисунок 2.10. Simulink модель білого шуму та її параметри

Параметр Noise power відповідає за величину спектральної щільності. Для моделювання будуть використовуватись значення вільного блукання кута, отримані в результаті дослідження шуму MEMС гіроскопів. Це значення записано у змінній DG_PSD. Також для корекції величини сигналу використовується множник DG_noise_gain.

Параметр Sample time відповідає за час кореляції шуму. В Simulink це значення пропонується задавати формулою $tc \approx \frac{1}{100} \frac{2\pi}{f_{\max}}$, де $f_{\max}$ смуга пропускання системи. Оскільки частота знімання сигналу з датчиків відома, Sample time задано у вигляді $1/fs$, де $fs=100$ Гц.

Результат моделювання шуму показано на рис. 2.11.

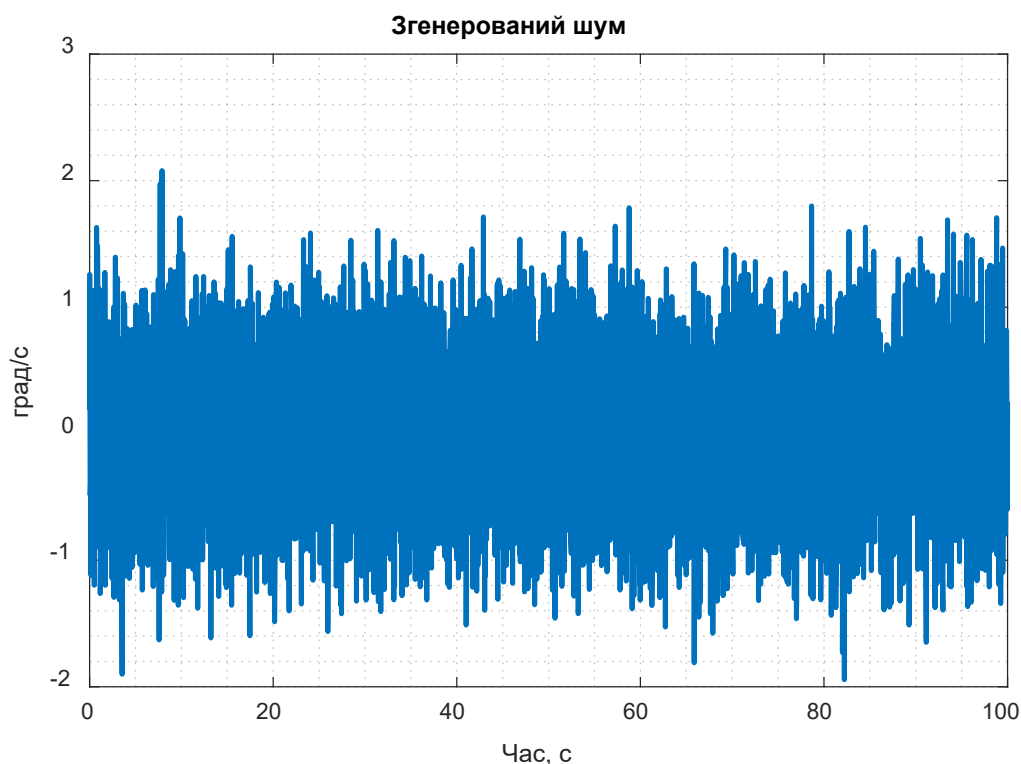


Рисунок 2.11. Реалізація моделі шуму MEMС гіроскопа

Зовнішній момент при ударному навантаженні

Для дослідження поведінки системи керування АБПА у випадку зіткнення з деяким об'єктом або рельєфом дна необхідно подати на вхід моделі короткий одиничний стрибкоподібний сигнал. Для цього можна використати блок Pulse

Generator. Він генерує імпульси прямокутної форми через рівні проміжки часу. Приклад моделі показано на рис. 2.12.

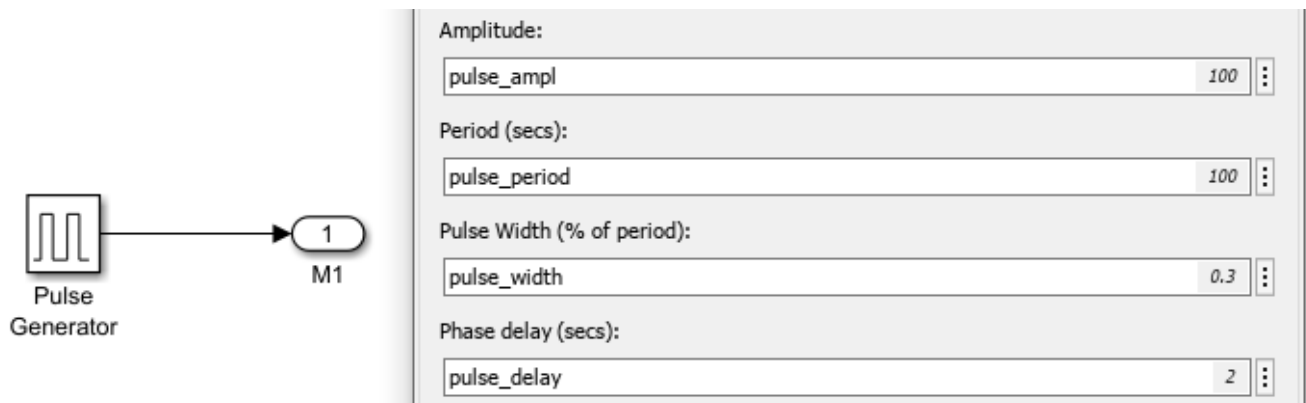


Рисунок 2.12. Simulink модель генератора імпульсів

Параметри Amplitude, Pulse Width, Period і Phase delay визначають форму вихідного сигналу. Оскільки для дослідження потрібно одиничний стрибок, то періодичність сигналу ставиться довшою за час моделювання, а ширина імпульсу відносно малою. Так як потенційні навантаження не можуть бути відомі завчасно, амплітуда імпульсу вибирається з міркувань максимально допустимого критичного значення. Приклад моделювання показано на рис. 2.13.

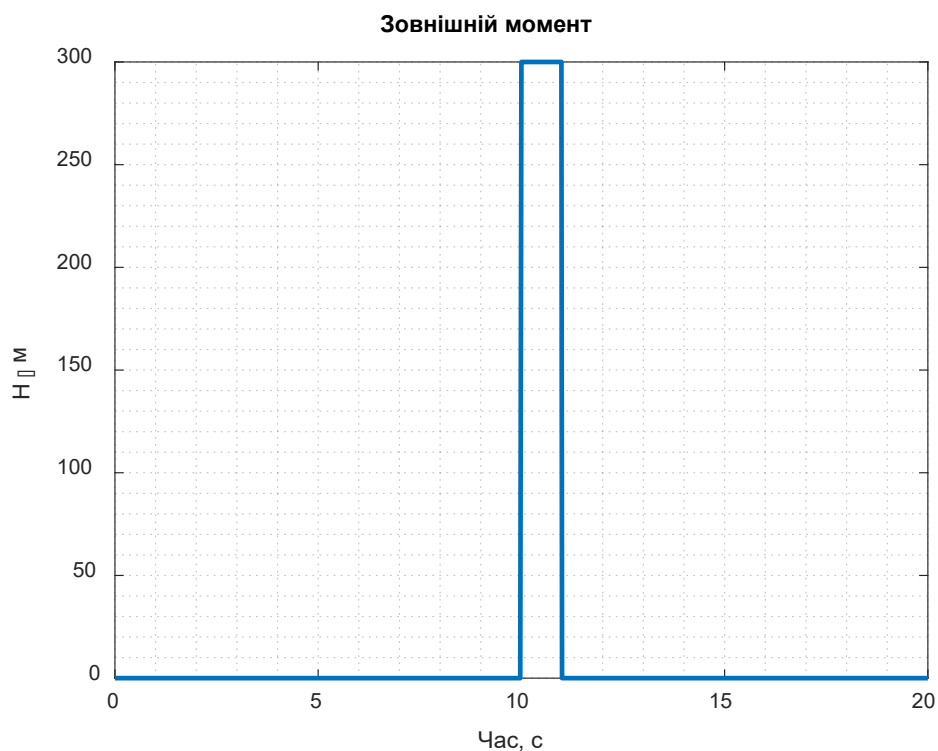


Рисунок 2.13. Модель зовнішнього ударного навантаження

Зовнішній момент при дії згасаючого коливального навантаження

Перевірка впливу короткочасного згасаючого навантаження може допомогти визначити швидкодію системи керування, а також визначити амплітуду коливань, на якій система може працювати стабільно. Дія такого збурення може бути обумовлена, наприклад вибуховою хвилею. Реалізацію моделі можна побачити на рис. 2.14. У блоці MATLAB Function прописано вираз (2.33). А блоки на вході, це, відповідно, параметри цього виразу. На рис. 2.15 зображено промодельований вплив.

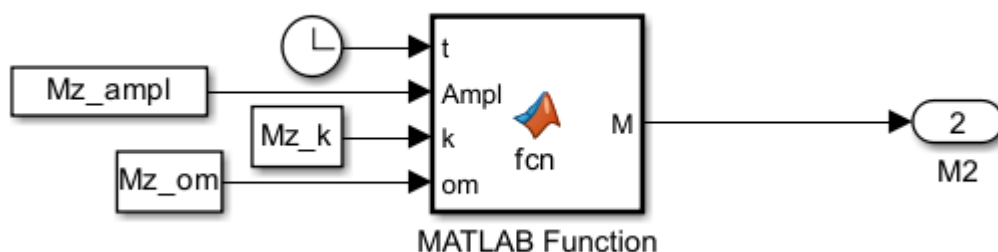


Рис. 2.14. Simulink модель зовнішнього згасаючого навантаження

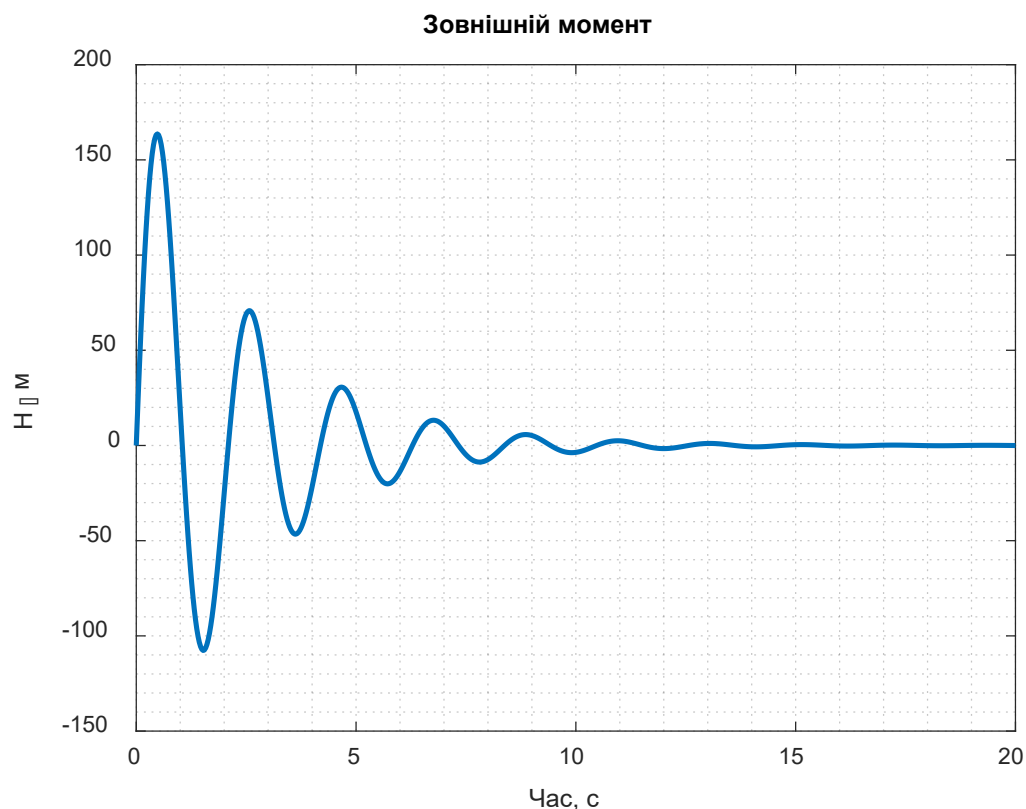


Рисунок 2.15. Реалізація моделі зовнішнього затухаючого навантаження

Зовнішній момент при дії гармонічного навантаження

Дослідження керованості АБПА під дією деякого гармонічного впливу також є досить важливим. Таке збурення може виникати, наприклад, під дією хитавиці, коли апарат знаходиться близько до поверхні води. Типовою реалізацією є використання блоку Sine Wave. Цей блок дає на виході синусоїдальний сигнал у вигляді $y = amplitude \times \sin(frequency \times time + phase) + bias$. В подальшому моделюванні можна використовувати синусоїду невеликої амплітуди і частоти, щоб перевірити роботу системи на довших проміжках часу. Модель та її параметри відображені на рис. 2.16. Приклад збурюючого моменту зображено на рис. 2.17.

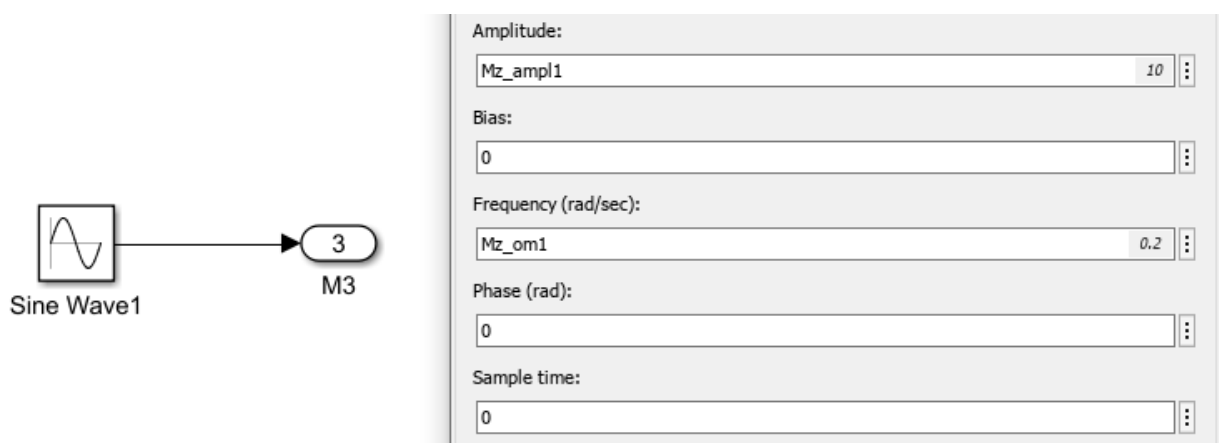


Рис. 2.16. Simulink модель гармонічного навантаження

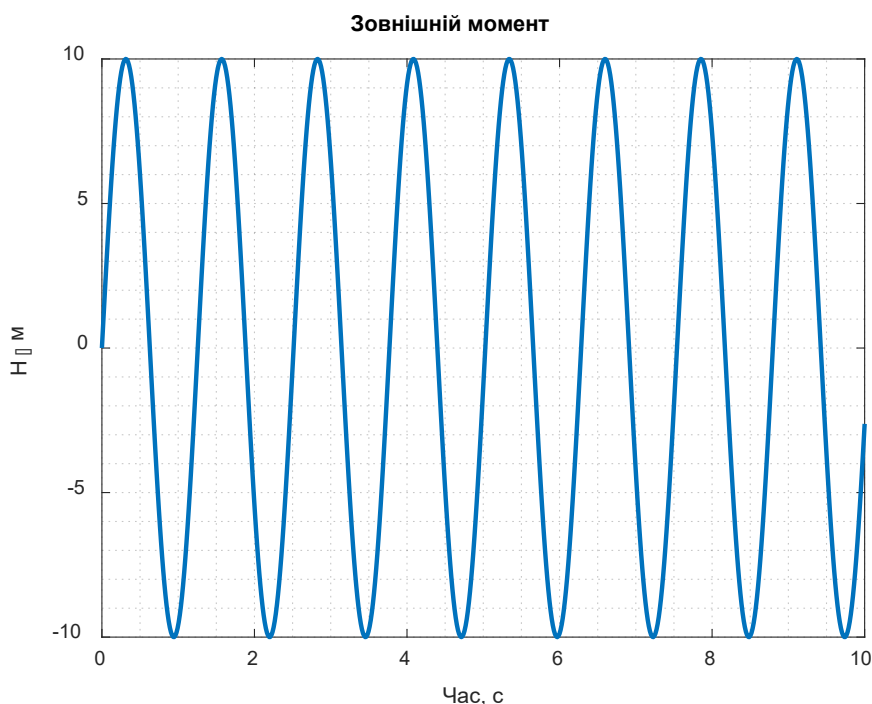


Рисунок 2.17. Реалізація моделі гармонічного навантаження

Висновки до розділу 2

1. Для проведення дослідження було обрано систему керування кутом курсу АБПА. Описано структурну схему системи керування та принцип її роботи. Наведено рівняння динаміки кожного з елементів системи, визначено передатні функції та необхідні для них параметри. Також систему перевірено на стійкість. Для цього було розраховано передатну функцію розімкненої системи та побудовано графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ, з яких видно що система стійка. Запас по амплітуді достатній, запас по фазі дорівнює $59,9^\circ$.

2. Проведено аналіз функціональних елементів системи, необхідних для проведення дослідження. Було запропоновано уточнити характеристики наявних в системі керування ідеальних ланок вільного та диференціюючого гіроскопів, врахувавши у моделях наявність шкідливих впливів детермінованих завад, похибок та шумів, які можуть виникати у реальній системі. В якості датчиків інформації системи обрано МЕМС пристрої. Наведено основні причини виникнення шумів у цих датчиках. Розглянуто основні характеристики МЕМС акселерометрів та гіроскопів, які визначають якість вихідного сигналу. Визначено наступні шумові складові, які виникають у датчиках: шум квантування, випадкове блукання кута, нестабільність нуля, випадкове блукання швидкості, тренд.

3. Описано метод варіацій Аллана для визначення шумових складових датчиків. Проведено дослідження шумів МЕМС гіроскопів Analog Devices ADXRS610 та Systron Donner LCG50-00500-100. Методом варіацій Аллана визначено шумові складові цих датчиків. Випадкове блукання кута для ADXRS610 становить $0.0278 \frac{^\circ/s}{\sqrt{Hz}}$, для LCG50-00500-100 - $0.0051 \frac{^\circ/s}{\sqrt{Hz}}$. Проведено порівняльний аналіз та показано, що результати відповідають заявленим характеристикам.

4. Описано можливі реалізації врахування шумів у моделі системи керування. Для дослідження впливу шуму запропоновано апроксимувати його білим шумом. Додатково було запропоновано провести моделювання впливу

зовнішніх неконтрольованих збурень системи у вигляді прикладеного до АБПА зовнішнього моменту. Проведено моделювання розглянутих неконтрольованих збурень, які будуть використані при моделюванні системи керування та визначенні їх впливу на показники якості керування.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА ЗОВНІШНІХ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ЗБУРЕНЬ

В другому розділі дуже велику увагу було приділено розгляду шумових характеристик МЕМС датчиків та способів їх визначення. Також було описано потенційні зовнішні збурення, які можуть виникати у процесі роботи АБПА. Визначення математичних моделей цих впливів та їх параметрів було необхідним для проведення подальшого дослідження.

В цьому розділі буде створена та описана Simulink модель системи керування АБПА. Ця модель базується на основі структурної схеми, описаної в другому розділі. Також буде розглянуто спосіб врахування у моделі шумів від датчиків інформації та впливу зовнішніх неконтрольованих збурень. Розроблено методику моделювання, за допомогою якої проведено подальше дослідження системи і проведено аналіз результатів моделювання.

3.1 Опис моделі в середовищі Simulink

На рис. 3.1 зображено Simulink модель системи керування кутом курсу АБПА. Дана модель побудована у відповідності до структурної схеми, що була розглянута у 2 розділі (рис. 2.1). На вході системи стоять блоки генерації (Ramp, Step), які формують вхідний сигнал регулювання кутом курсу АБПА. Промодельовані вхідні та вихідні значення системи зберігаються в середовищі Matlab Workspace для подальшого їх аналізу та отримання графіків.

Жовтим кольором виділено частину моделі, в якій на блоки Derivative (диференціатор) та Gain подається величина зміни заданого кута курсу відносно поточного. Ці блоки відповідно моделюють роботу диференціюючого та вільного гіроскопів. Припускається, що в якості диференціюючого гіроскопа використовується МЕМС гіроскоп, а в якості вільного, наприклад, МЕМС

магнітометр. На виході ці значення поєднані суматором, формуючи керуючий сигнал з датчиків інформації системи.

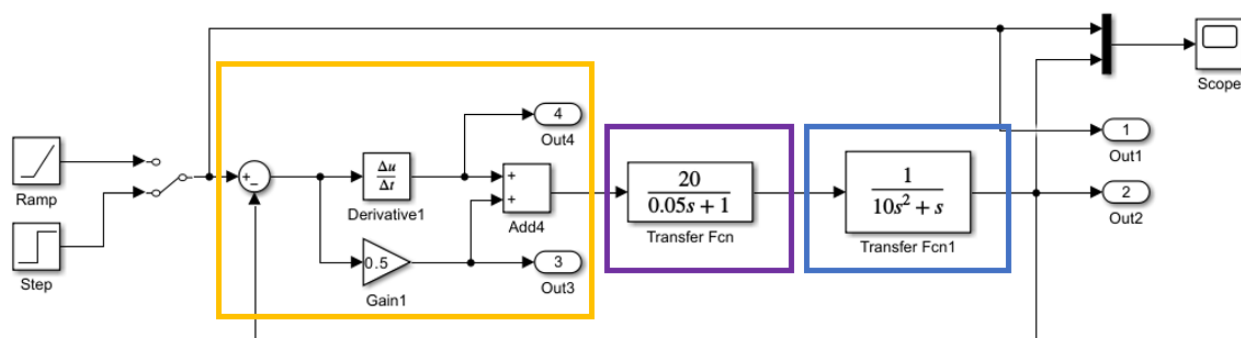


Рисунок 3.1. Simulink модель системи керування без врахування неконтрольованих збурень

Фіолетовим кольором виділено блок Transfer Fcn, який формує загальну передатну функцію ланок, охоплених жорстким зворотнім зв'язком. На виході цього блоку отримуємо значення кута відхилення рушія АБПА.

Синім кольором виділено сам об'єкт керування – АБПА.

Параметри всіх блоків визначені у відповідності із запропонованими у 2 розділі значеннями.

Для дослідження впливів шуму датчиків інформації та зовнішніх збурень модель необхідно модифікувати. На рис. 3.2 зображено Simulink модель, яка враховує ці чинники.

Зеленим кольором виділено блоки генерації білого шуму, які підключені на виходах диференціюючого та вільного гіроскопів. Таке включення дає можливість імітувати шуми реальних датчиків. Доцільність використання білого шуму та задання його параметрів було описано у 2 розділі.

Червоним кольором показано інтеграцію у систему керування зовнішнього моменту. Математично його вплив на систему описано виразом (2.6). Характер цього збурення може бути різним. Потенційні моделі зовнішніх збурень також були розглянуті у 2 розділі.

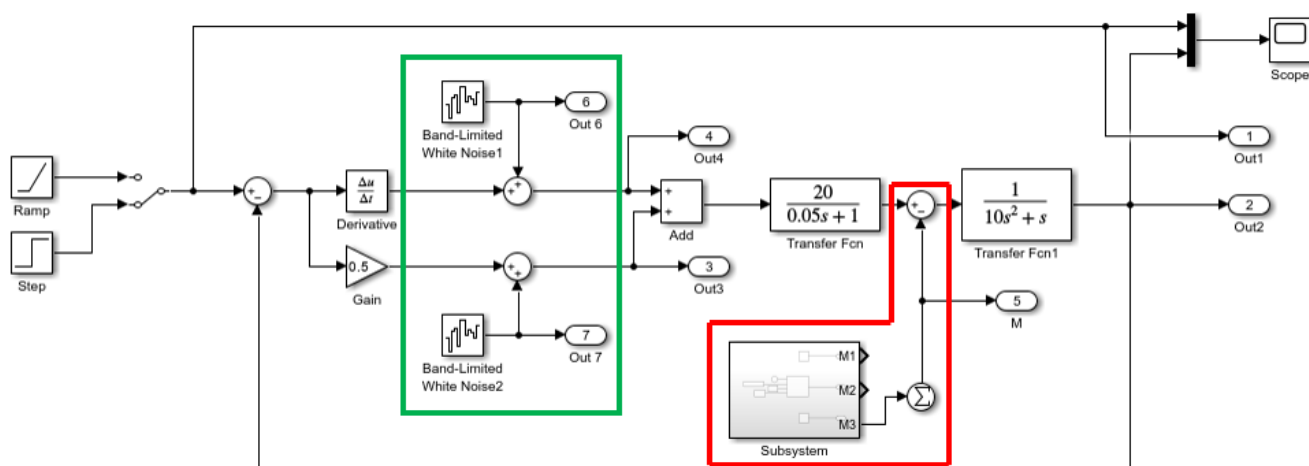


Рисунок 3.2. Simulink модель системи керування з врахуванням неконтрольованих збурень

Для візуальної оптимізації моделі, різні зовнішні збурення були об'єднані у підсистему Subsystem (рис. 3.3).

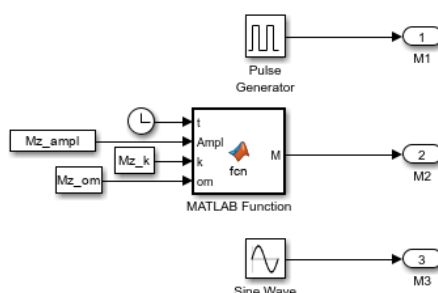


Рисунок 3.3. Підсистема для формування зовнішніх збурень

Після опису моделі системи керування АБПА перейдемо до створення методики моделювання. Розробка методики дозволить структурувати проведення дослідження та полегшити аналіз його результатів.

3.2 Методика моделювання

Запропонована методика моделювання системи керування полягає у визначенні послідовності проведення різних досліджень, спрямованих на визначення якості відпрацювання системи керування АБПА за умови дії на нього різних шкідливих збурень. Для кожного етапу дослідження буде зазначено тип

експериментального збурення, яке буде досліджуватись. Також будуть задані параметри моделі та час моделювання.

1. Дослідження системи без збурень. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step). Проведення аналізу перехідної характеристики.

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 2;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Час моделювання 15 секунд.

2. Дослідження впливу шуму MEMС гіроскопа ADXRS610. На виході з блоку Derivative підключається генератор білого шуму. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 2;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Band-Limited White Noise1:

- Noise power = 0.0278;
- Sample time = 1/100.

Час моделювання 100 секунд.

3. Дослідження впливу шуму MEMС гіроскопа LCG50-00500-100. На виході з блоку Derivative підключається генератор білого шуму. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 2;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;

- Sample time = 0.

Параметри блоку Band-Limited White Noise1:

- Noise power = 0.0051;
- Sample time = 1/100.

Час моделювання 100 секунд.

4. Дослідження впливу шуму MEMC магнітометра. На виході з блоку Gain підключається генератор білого шуму. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 2;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Band-Limited White Noise2:

- Noise power = 0.0086;
- Sample time = 1/100.

Час моделювання 100 секунд.

5. Дослідження впливу шуму MEMC гіроскопа LCG50-00500-100 та MEMC магнітометра, підключених одночасно. На виходах з блоків Derivative та Gain підключаються генератори білого шуму. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 2;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Band-Limited White Noise1:

- Noise power = 0.0051;
- Sample time = 1/100.

Параметри блоку Band-Limited White Noise2:

- Noise power = 0.0086;
- Sample time = 1/100.

Час моделювання 100 секунд.

6. Дослідження впливу зовнішнього ударного збурення. На вхід блоку Transfer Fcn1 підключається генератор імпульсів Pulse Generator. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 0;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Pulse Generator:

- Amplitude = 300;
- Period (secs) = 100;
- Pulse Width (% of period) = 1;
- Pulse delay (secs) = 10.

Час моделювання 25 секунд.

7. Дослідження впливу зовнішнього згасаючого збурення. На вхід блоку Transfer Fcn1 підключається блок MATLAB Function. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 0;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку MATLAB Function:

- Ampl = 300;
- k = 0.8;

- $\omega_m = 5$.

Час моделювання 10 секунд.

8. Дослідження впливу зовнішнього гармонічного збурення. На вхід блоку Transfer Fcn1 підключається блок Sine Wave. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 0;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Sine Wave:

- Amplitude = 10;
- Bias = 0;
- Frequency (rad/sec) = 2;
- Phase (rad) = 0.

Час моделювання 20 секунд.

9. Дослідження одночасного впливу зовнішнього ударного навантаження та шуму від датчиків при лінійно наростаючому значенні кута на вході. На вхід блоку Transfer Fcn1 підключається генератор імпульсів Pulse Generator. На вхід системи подається сигнал з блоку Ramp.

Параметри блоку Step на вході системи:

- Slope = 6;
- Start time = 0;
- Initial output = 0;

Параметри блоку Band-Limited White Noise1:

- Noise power = 0.0051;
- Sample time = 1/100.

Параметри блоку Band-Limited White Noise2:

- Noise power = 0.0086;

- Sample time = 1/100.

Параметри блоку Pulse Generator:

- Amplitude = 300;
- Period (secs) = 100;
- Pulse Width (% of period) = 1;
- Pulse delay (secs) = 10.

Час моделювання 25 секунд.

10. Дослідження одночасного впливу зовнішнього гармонічного збурення та шуму від датчиків при постійному значенні кута на вході. На вхід блоку Transfer Fcn1 підключається блок Sine Wave. На вхід системи подається одинична ступінчата дія (блок Step).

Параметри блоку Step на вході системи:

- Step time = 0;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Параметри блоку Band-Limited White Noise1:

- Noise power = 0.0051;
- Sample time = 1/100.

Параметри блоку Band-Limited White Noise2:

- Noise power = 0.0086;
- Sample time = 1/100.

Параметри блоку Sine Wave:

- Amplitude = 10;
- Bias = 0;
- Frequency (rad/sec) = 2;
- Phase (rad) = 0.

Час моделювання 100 секунд.

3.3 Проведення моделювання і аналіз результатів

Перший етап дослідження дає можливість визначити та оцінити перехідну характеристику системи керування. Його результати можна побачити на рис.3.4. На систему не діють ніякі сторонні впливи. Як бачимо час відпрацювання системи становить приблизно 8 секунд. Далі вихідне значення сягає рівня в 1 градус і співпадає із вхідним значенням. Можна зробити висновок, що система керування кутом курсу за таких умов працює коректно.

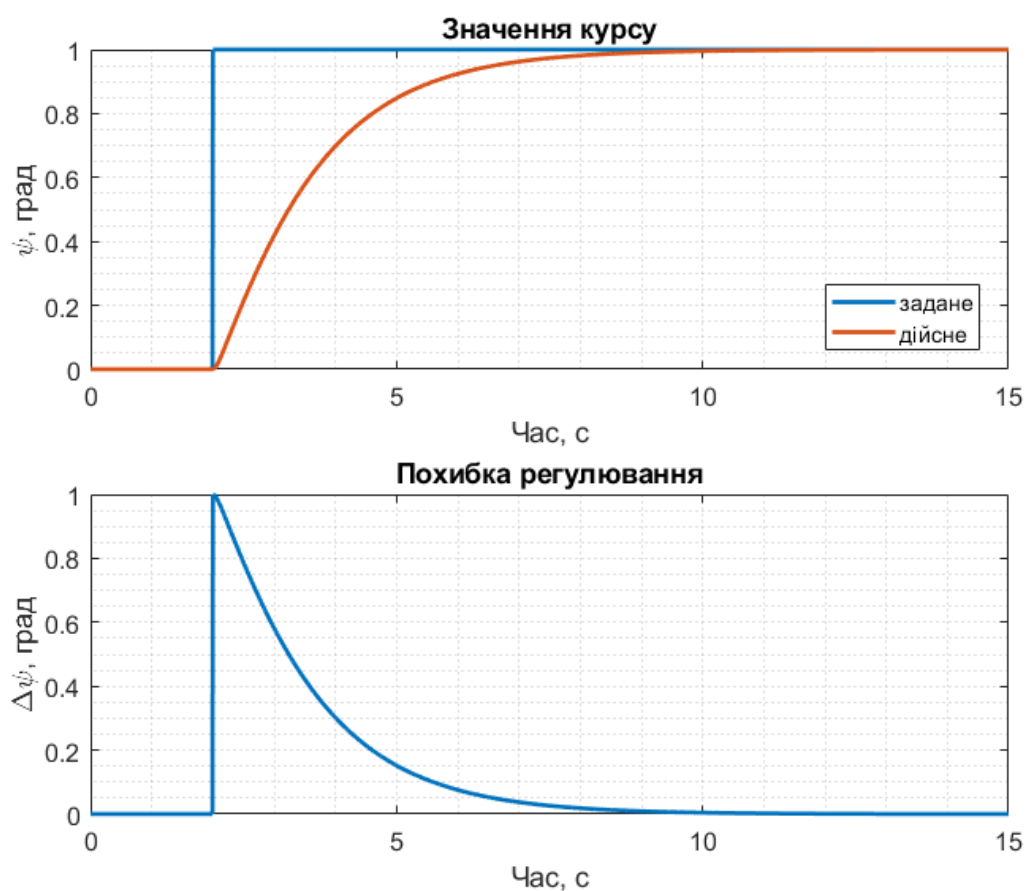


Рисунок 3.4. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні без зовнішніх збурень

Пункти 2 і 3 з методики моделювання спрямовані на дослідження впливу на систему керування шумів двох датчиків кутової швидкості. На рис. 3.5 зображено результат роботи системи керування з врахуванням шумів гіроскопа ADXRS610. На рис. 3.6 зображено відповідне дослідження, яке проведено для датчика LCG50-

00500-100. На обох графіках видно перехідний процес на початку моделювання, який обумовлено відпрацюванням заданого значення кута курсу. Також видно, що через наявність шуму, якість роботи системи падає. При роботі ADXRS610 вихідні значення коливаються в межах ± 0.45 градусів. А при роботі LCG50-00500-100 - ± 0.15 градусів. Видно пряму залежність якості керування від характеристики спектральної щільності шуму датчиків ($0.0278 \frac{^\circ/s}{\sqrt{Hz}}$ для ADXRS610 і $0.0051 \frac{^\circ/s}{\sqrt{Hz}}$ для LCG50-00500-100).

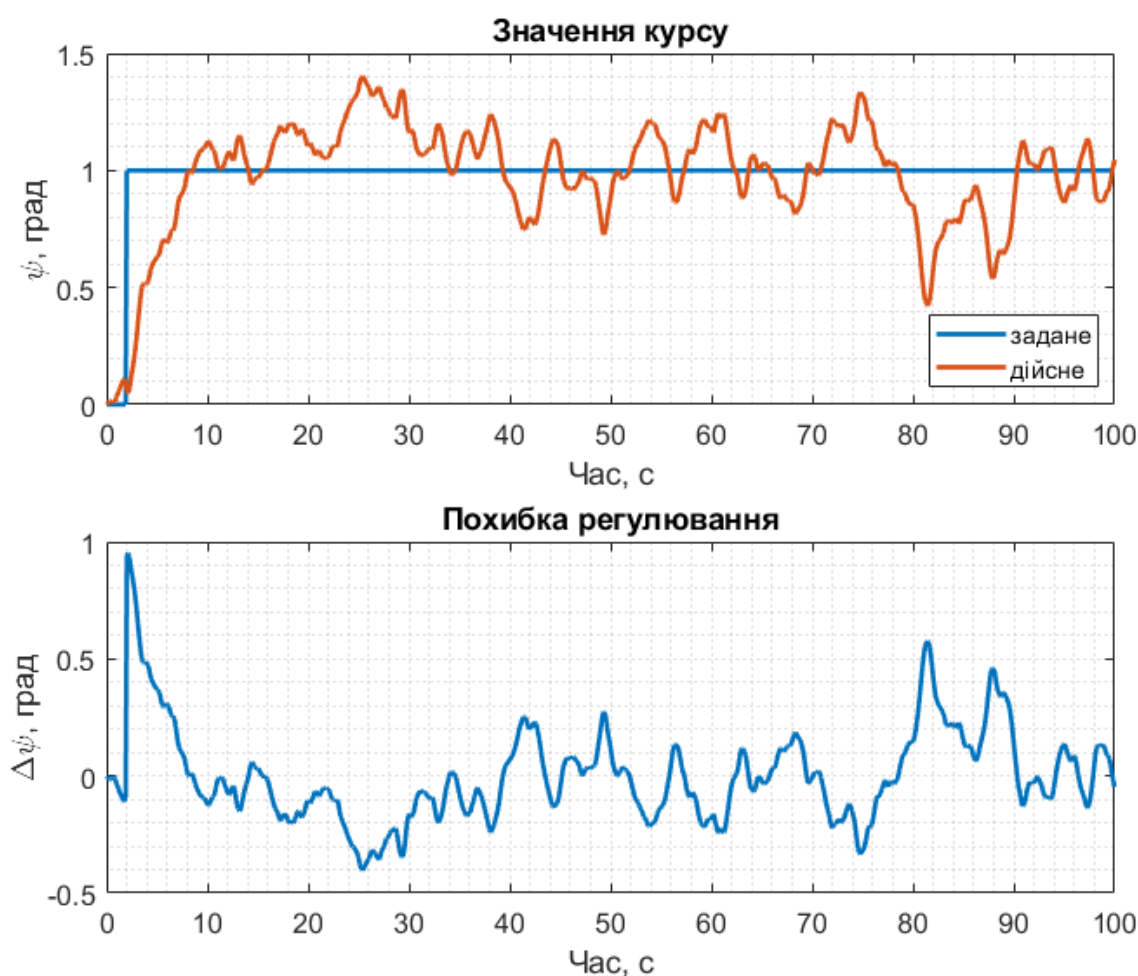


Рисунок 3.5. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні шуму гіроскопа ADXRS610

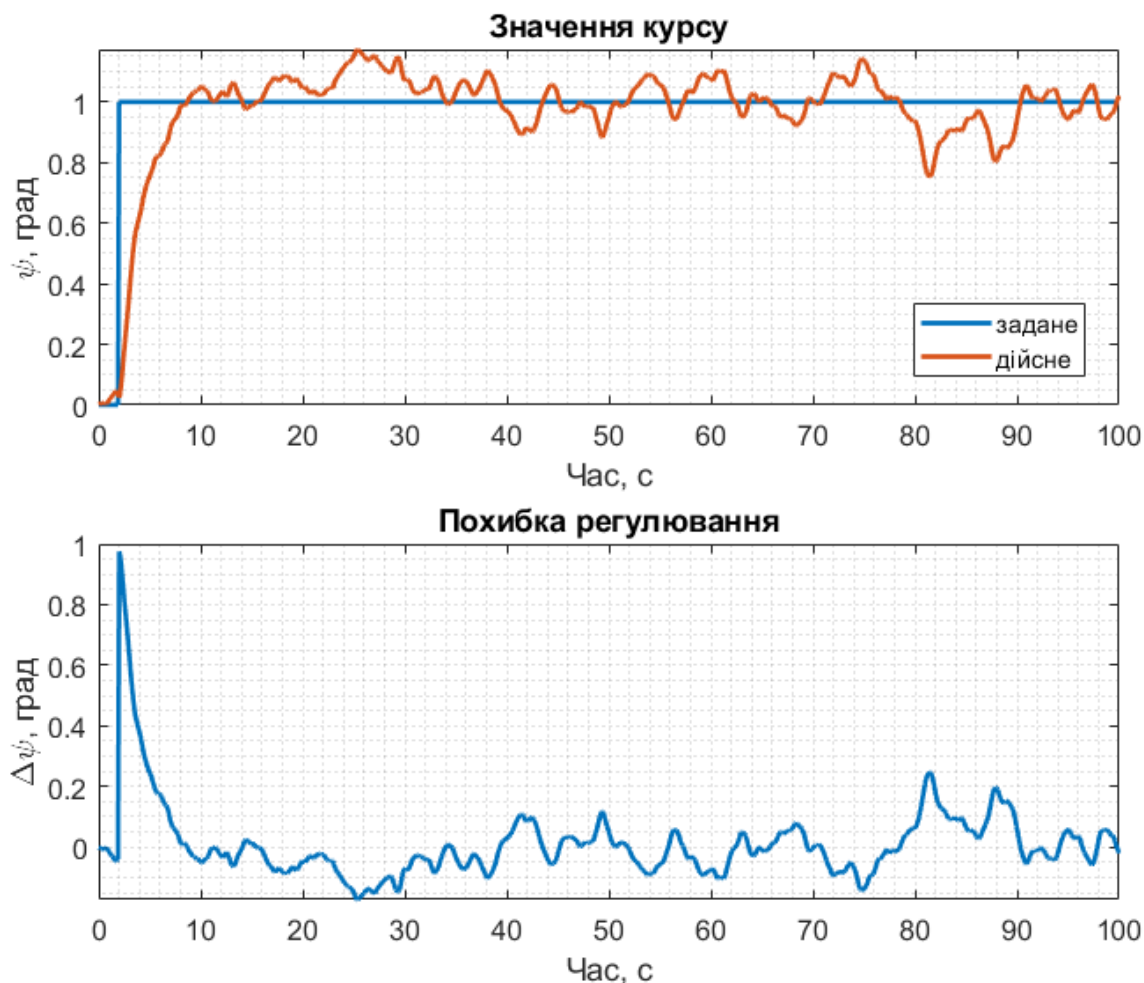


Рисунок 3.6. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні шуму гіроскопа LCG50-00500-100

Результат проведеного моделювання по 4 пункту визначеної методики зображено на рис. 3.7. В ньому досліджувався вплив шуму датчика кута на систему керування. Оскільки сигнали з датчиків інформації системи просто додаються, то отриманий вихідний сигнал буде аналогічним до результатів моделювання системи з шумом від датчика кутової швидкості. Величина спектральної щільності шуму становить 0.0086. Таке значення обрано з огляду на шуми типового МЕМС магнітометра. В результаті на виході системи керування дійсне значення курсу коливається в межах ± 0.2 градуси.

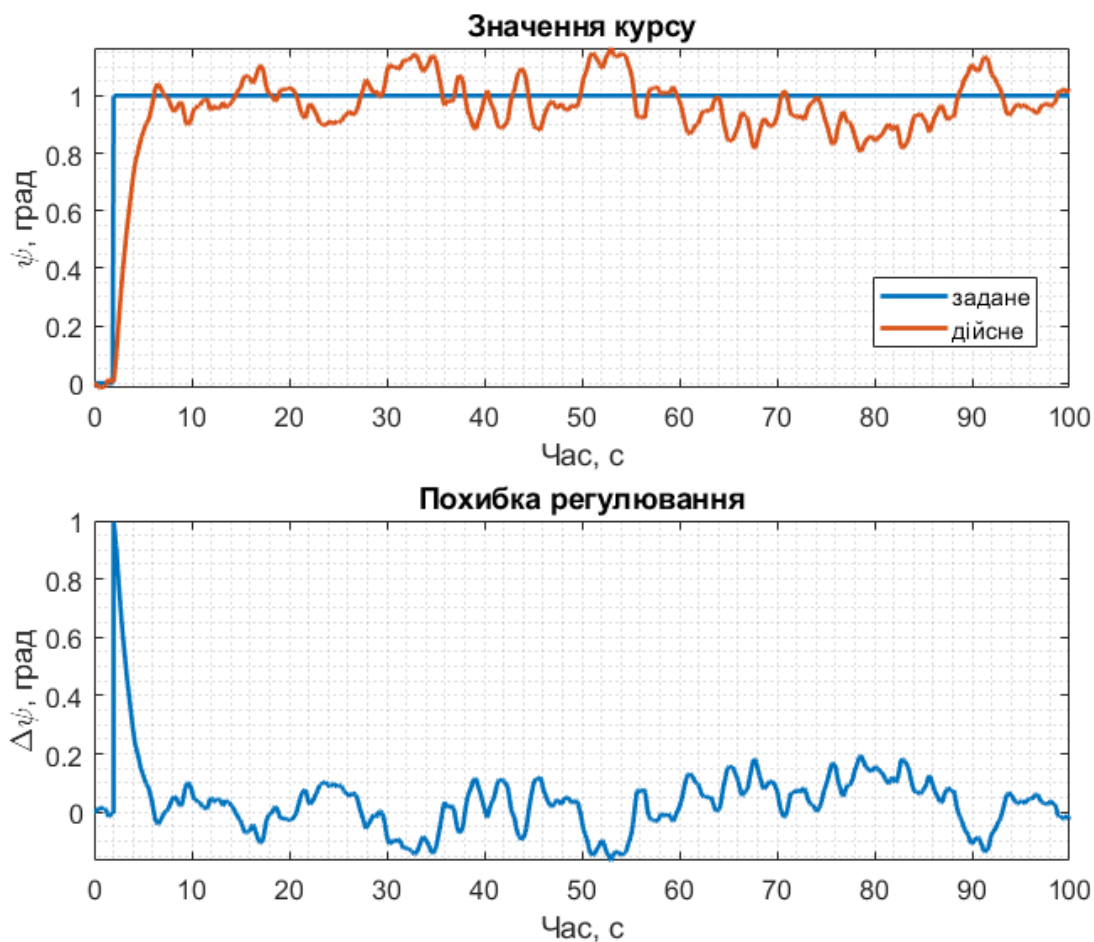


Рисунок 3.7. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні шуму MEMС датчика кута

Наступне дослідження (рис. 3.8) має за мету визначити якість керування АБПА, коли в системі враховуються шуми з обох датчиків. Було обрано гіроскоп LCG50-00500-100, так як він має кращі шумові характеристики. В якості датчика кута залишено приклад з попереднього досліді. В результаті дослідження можна оцінити роботу системи, більш наближеної до реальної. Вихідне значення курсу АБПА коливається в межах ± 0.25 градусів. Можна зробити попередній висновок, що при дії на систему керування шумів датчиків інформації АБПА все одно залишається керованим, проте якість керування падає. Також можна припустити, що в реальній системі постійні відпрацювання в межах 1 градуса будуть негативно впливати на автономність АБПА та на ресурс його механічних елементів, що відповідають за керування.

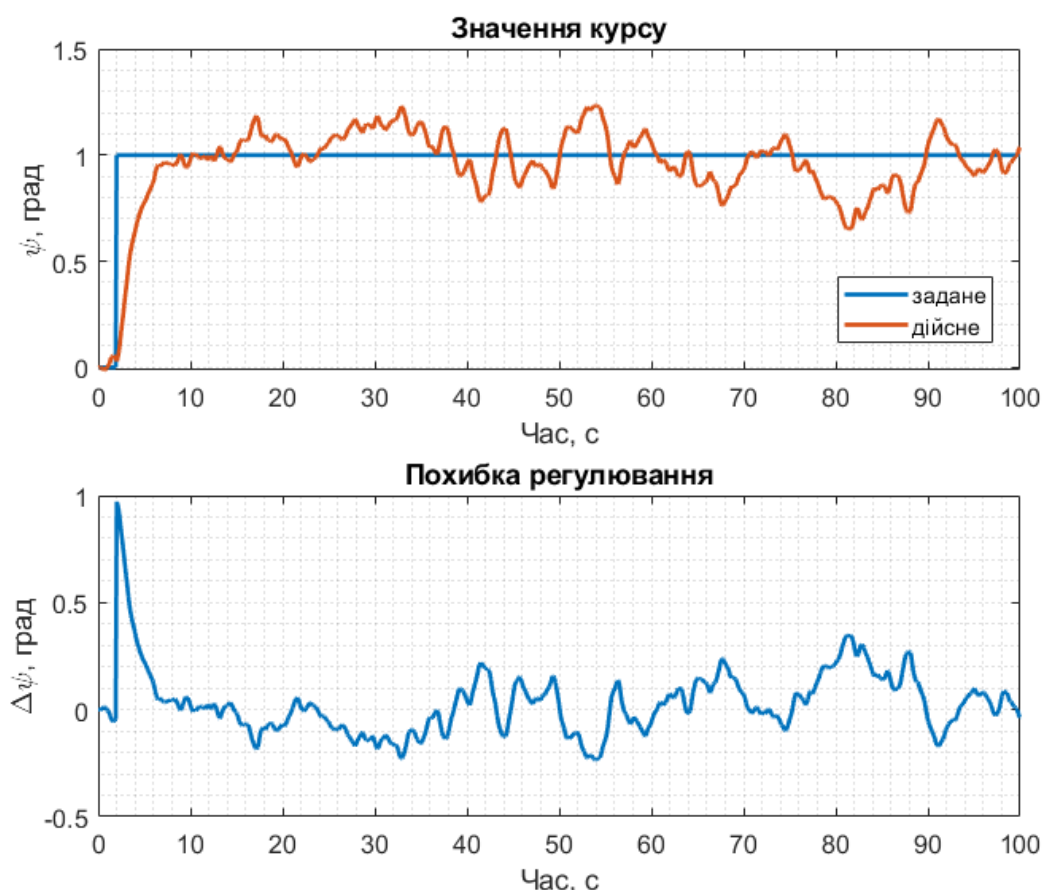


Рисунок 3.8. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні шумів від MEMС датчика кута та гіроскопа LCG50-00500-100

У пунктах 6 – 8 методики моделювання розглядається вплив на систему керування різних типів зовнішніх збурень.

Перший сценарій, який було вирішено перевірити, це реакція системи керування на удар (рис. 3.9). На вхід системи подається стале значення кута. Зовнішній момент подається у вигляді одиничного імпульсу (рис. 3.10). Величина імпульсу становить 300 Нм. З графіка моделі видно, що в момент удару апарат відхилився на 10.6 градусів приблизно за 1.5 секунди. Упродовж наступних 8.5 секунд він знову повернувся на заданий курс. Можна зробити висновок, що під дією таких короткочасних навантажень апарат залишається керованим.

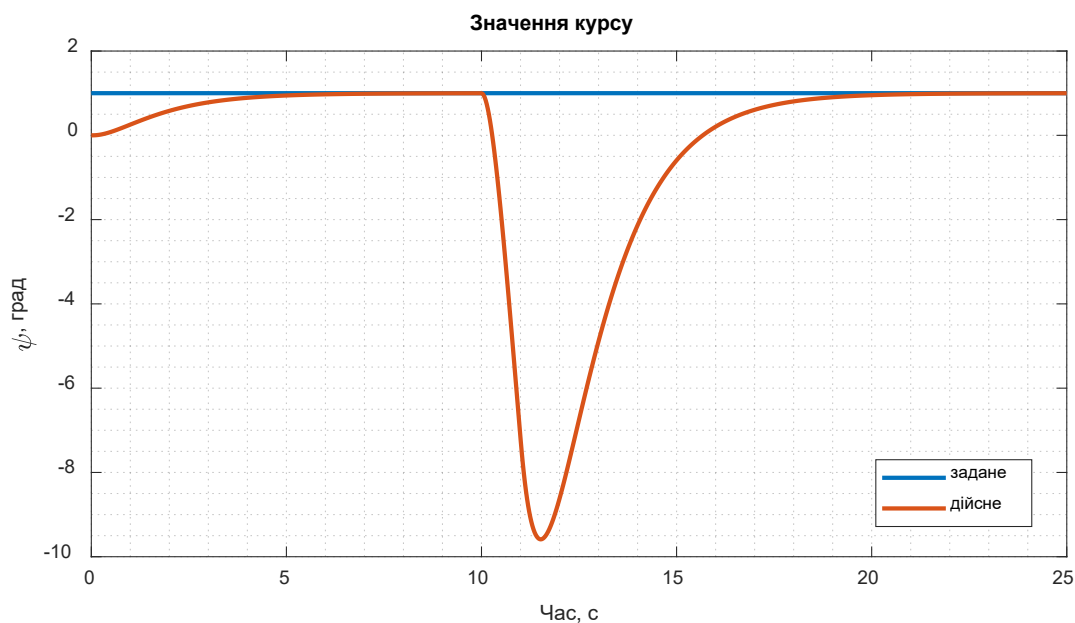


Рисунок 3.9. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні дії ударного навантаження

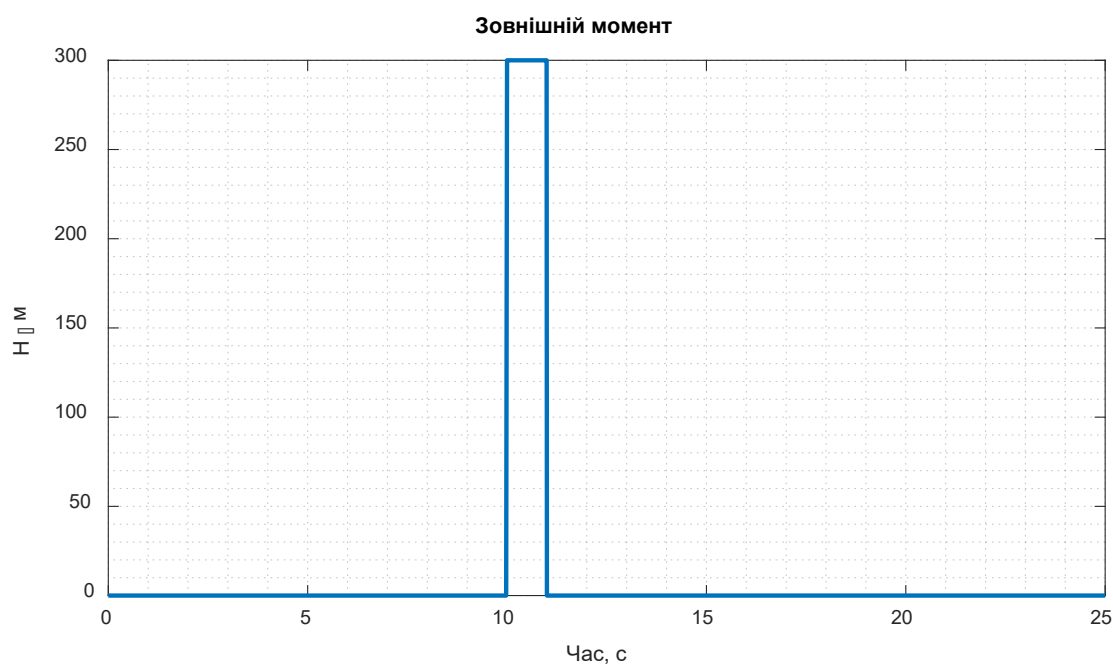


Рисунок 3.10. Графік зовнішнього ударного навантаження

У пункті 7 методики моделювання розглядається вплив на систему керування згасаючого коливального збурення. Результати моделювання зображено на рис. 3.11. Як і при проведенні моделювання попереднього збурення, бачимо перехідний процес системи, в момент дії на неї зовнішнього збурення. У порівнянні з ударом бачимо, що, хоч амплітуда зовнішнього збурення достатньо висока

(максимальне значення сягає 240 Нм), вона діє на меншому проміжку часу. Система керування не може так швидко сприйняти цю реакцію. Відповідно до цього максимальна величина відхилення апарату становить лише 2.7° .

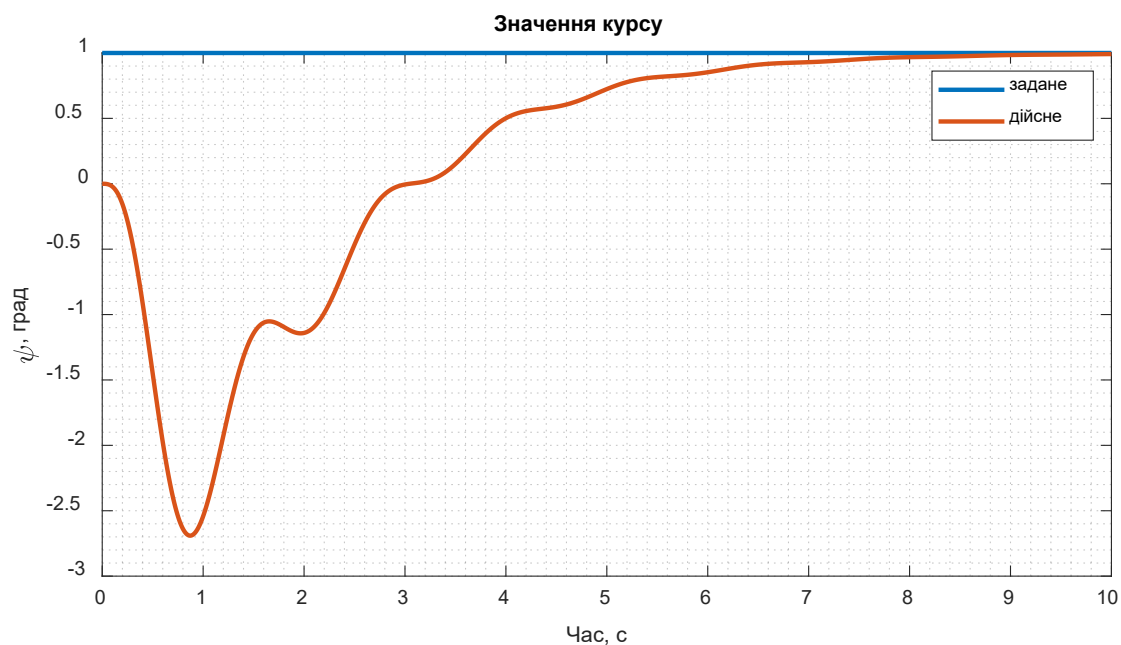


Рисунок 3.11. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні дії згасаючого збурення

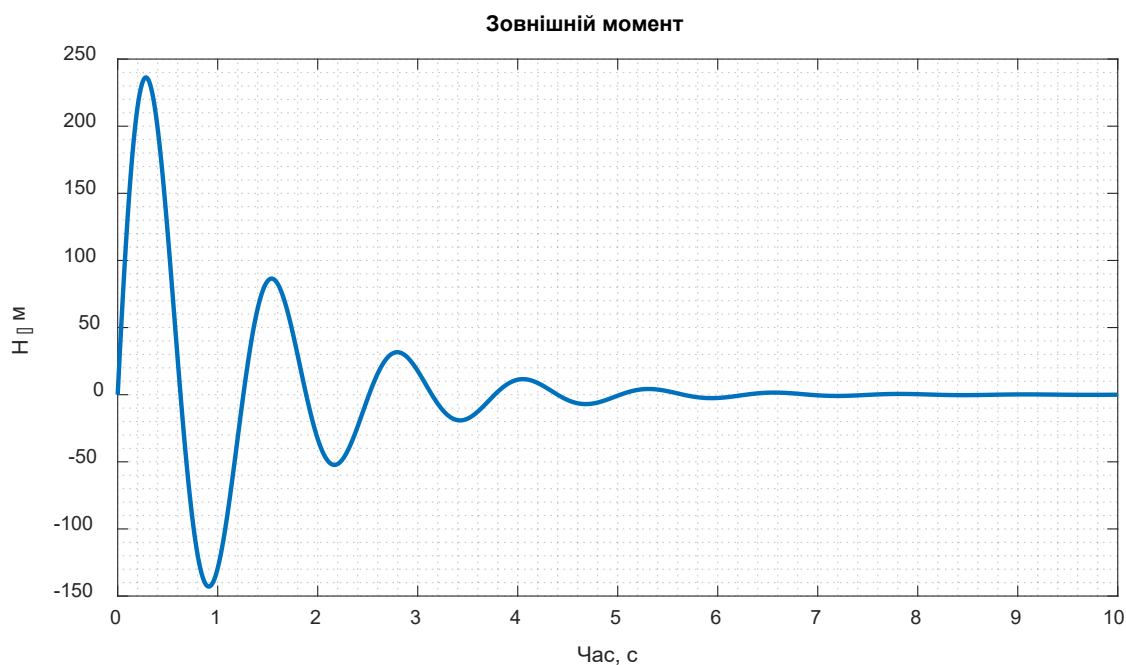


Рисунок 3.12. Графік згасаючого збурення

Далі пропонується розглянути вплив на систему керування гармонічних коливань, спричинених хитавицею АБПА. Результат моделювання можна

побачити на рис. 3.13. Зовнішній момент, прикладений до апарату, на рис. 3.14. Основною ідеєю є перевірка роботи при дії невеликих за амплітудою зовнішніх коливань. Як бачимо, апарат сприймає та відпрацьовує ці коливання. При амплітуді зовнішнього моменту в 10 Нм, амплітуда відхилення курсу апарату становить 0.25° .

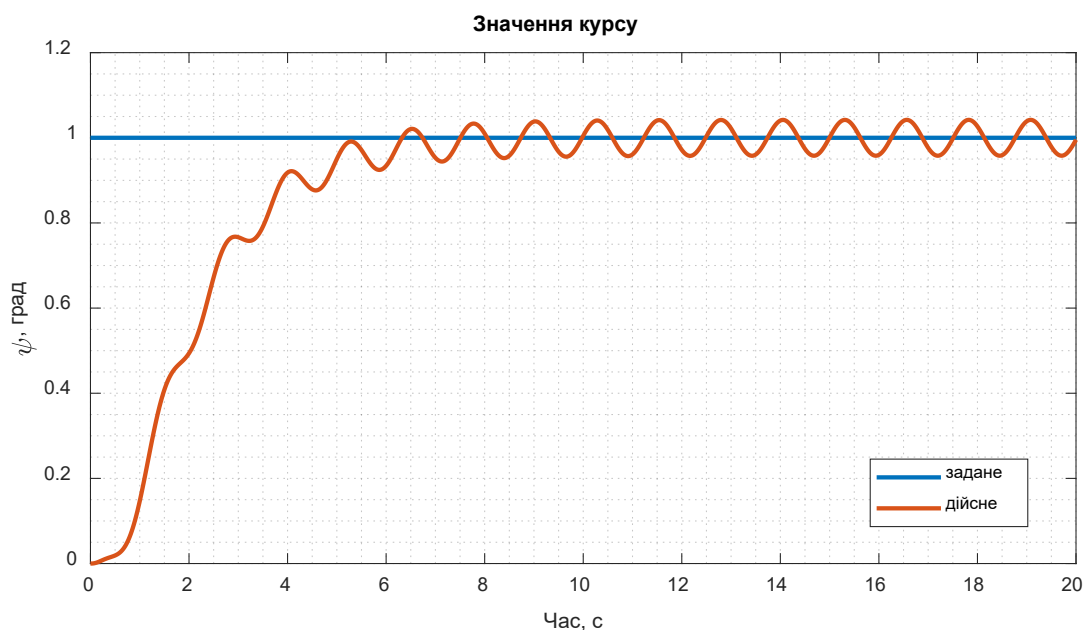


Рисунок 3.13. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні дії гармонічного збурення

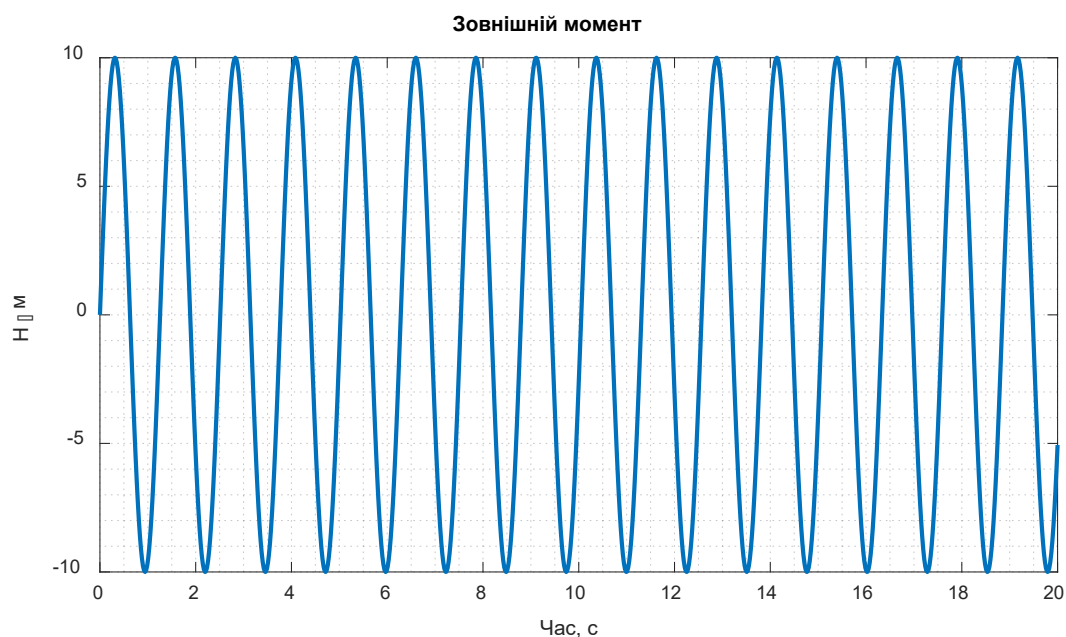


Рисунок 3.14. Графік гармонічного збурення

Останнім етапом проведення дослідження буде комплексне моделювання різних параметричних збурень, де буде враховано вплив від шуму датчиків інформації та від зовнішнього моменту.

У пункті 9 методики моделювання розглядається вплив ударного навантаження під час виконання апаратом руху по дуговій траєкторії з постійним кутом повороту. Результат моделювання вказано на рис. 3.15. На графіку похибки регулювання бачимо невеликий перехідний процес на початку. Він обумовлений виведенням системи із стану спокою.

В момент ударного навантаження на систему керування максимальне відхилення становить 11.2° . Час відпрацювання удару становить 6.5 с. Якщо порівнювати з моделюванням удару при постійному значенні курсу, то це значення зменшилось на 2 секунди. Це можна пояснити тим, що керуючий сигнал направлений проти напрямку дії удару. Таким чином його дія компенсується швидше.

Також можна помітити на графіку постійну похибку регулювання, яка становить 0.6° . Величина цієї похибки пропорційна швидкості зміни керуючого сигналу на вході системи.

Також слід описати вплив шумів при такому сценарії використання. Під час перехідних процесів похибка регулювання спричинена шумами практично не впливає на керування, але вона все ще є вагомою під час усталеного режиму роботи.

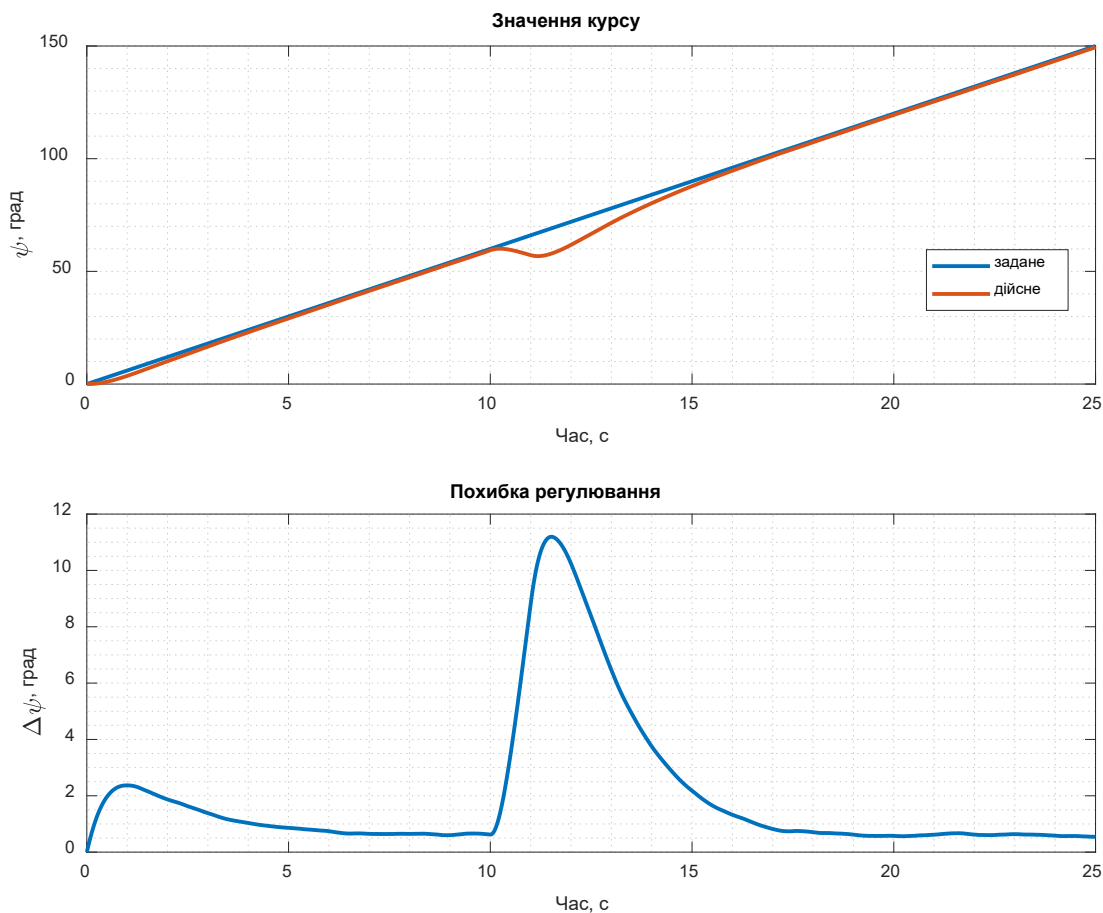


Рисунок 3.15. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні одночасної дії шумів датчиків та ударного навантаження

В 10 пункті методики моделювання розглядається дія одночасного впливу зовнішнього гармонічного збурення та шуму від датчиків при постійному значенні кута на вході. Результат моделювання вказано на рис. 3.16. В цьому дослідженні на апарат діє зовнішній момент з амплітудою 10 Нм і частотою 2 рад/с. Якщо порівняти цей результат з тим, що розглянуто у пункті 8, можна побачити, що похибка керування зросла. Тепер вона становить $\pm 0.35^\circ$. Це обумовлено наявністю шумів у роботі системи. Також видно спотворення форми вихідного сигналу системи. Загалом можна зробити висновок, що при такому сценарії роботи апарату система керування буде постійно відпрацьовувати такі невеликі за амплітудою низькочастотні коливання, що не є добре. Можливим способом вирішення цієї проблеми буде використання фільтрів у системі керування.

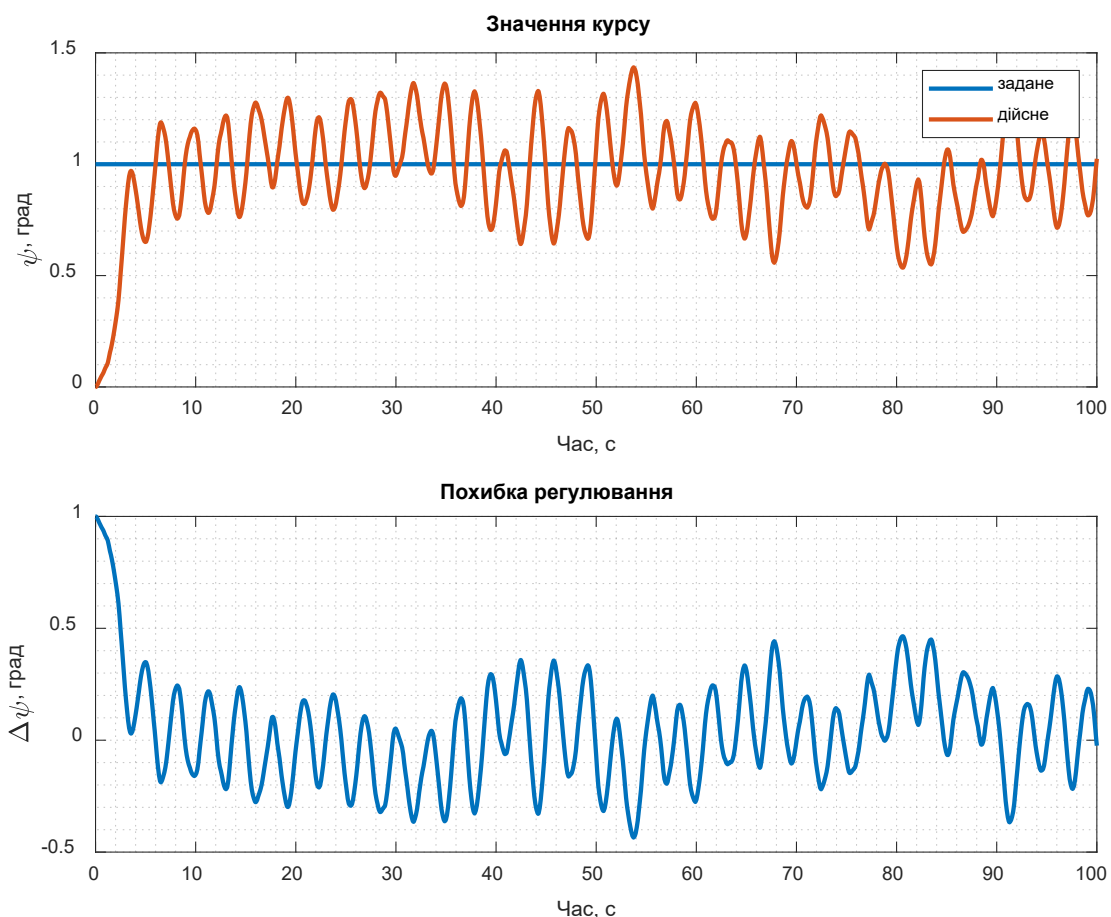


Рисунок 3.16. Порівняння вхідного та вихідного значення кута при моделюванні одночасної дії шумів датчиків та гармонічного навантаження

Висновки до розділу 3

1. У цьому розділі було запропоновано та описано Simulink модель системи керування кутом курсу АБПА. Особливістю даної моделі є можливість дослідження впливу параметричних та неконтрольованих збурень. Було описано, яким чином реалізується врахування у системі шумів датчиків інформації. Проведено структурний опис системи, її принципу роботи та використаних в ній функціональних блоків Simulink.

2. Розроблено методику моделювання системи керування. Головною метою є встановлення впливу неконтрольованих внутрішніх та зовнішніх збурень на якість системи керування кутом курсу АБПА. Виділено 10 етапів моделювання, кожен з яких повинен визначити реакцію системи керування на дію різних

зовнішніх чинників. Визначено тип зовнішнього збурення, всі необхідні параметри моделі та час моделювання.

3. Проведено ряд дослідів, визначених методикою моделювання. На першому етапі була промодельована перехідна характеристика системи. Встановлено, що система коректно відпрацьовує заданий курс. На етапах 2 – 5 було визначено вплив шуму датчиків інформації в системі. Спочатку було проведено моделювання окремо для кожного датчика. Визначено, що шум датчиків помітно впливає на роботу системи керування. З результатів моделювання видно пряму залежність якості керування від шумових характеристик датчиків. В перехідному режимі роботи на виході системи генеруються відхилення в межах $0.15^{\circ} - 0.45^{\circ}$ від необхідного значення в залежності від заданих параметрів датчиків. На 5 етапі визначено сумарний вплив шумів вільного та диференціюючого гіроскопів. Встановлено, що, за даної конфігурації системи, шуми кожного з датчиків рівноцінно впливають на якість її роботи. При заданих параметрах похибка керування становить 0.25° . На етапах 6 – 8 досліджувалась поведінка системи керування при дії на неї різних зовнішніх збурень. По черзі проведено моделювання впливу ударного навантаження, згасаючого коливального навантаження та хитавиці. За результатами цих дослідів можна зробити висновок, що система здатна відпрацьовувати зовнішні збурення. Також встановлена пряма залежність часу відпрацювання системи від амплітуди зовнішнього збурення. Можна виокремити негативний вплив гармонічного збурення. Система керування постійно робить корекції на це збурення та не може налаштуватись на заданий курс. Завершальні дослідження проведені на етапах 9 та 10, де проводилось моделювання сумарного впливу від шумів датчиків та зовнішніх збурень. З отриманих результатів видно, що система керування може працювати в таких умовах. Було встановлено, що система має невелику постійну похибку регулювання при відпрацюванні зміни заданого значення курсу. Також залишається проблема відпрацювання похибок корекції від шумів та невеликих постійних збурень.

4. Вирішенням проблеми нестабільного визначення курсу системи при дії шумів та постійних збурень може бути застосування фільтрів. Наприклад,

оптимальний фільтр Калмана, комплементарні фільтри, фільтр «альфа-бета», фільтр «ковзне середнє». Для усунення постійної похибки корегування можна застосувати її компенсацію. Для цього необхідно провести налаштування різних режимів роботи і для кожного з них визначити величину компенсації. Також можна провести налаштування параметрів системи шляхом збільшення коефіцієнту розімкненої системи.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ ЗА НАЯВНОСТІ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ЗБУРЕНЬ»

4.1 Опис ідеї проекту та технологічний аудит ідеї проекту

Центральна ідея полягає в зборі даних процесу керування безпілотним підводним апаратом за наявності неконтрольованих збурень, що дозволить на основі зібраної інформації покращити систему керування. Було виконано аналіз різних сфер застосування. Розглянуто переваги, які користувач може отримати в залежності від напрямку використання отриманих даних (табл. 4.1) [34].

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дані о керуванні безпілотним підводним апаратом за наявності неконтрольованих збурень	Наукові дослідження	Автоматизація процесу моніторингу стану води дає можливість зібрати більше даних для проведення досліджень
	Картографування	Збільшення кількості режимів роботи системи керування може сприяти покращенню процесу знімання рельєфу дна
	Приладобудування	Використання моделі системи керування може значно зменшити витрати на дослідницькі роботи
	Військове застосування	Покращення керованості грає важливу роль у виконанні розвідки підводного середовища

Висновок: Отримані дані мають потенціал значно поліпшити окремі аспекти функціонування системи керування підводним апаратом. Перспективи використання охоплюють широкий спектр галузей, включаючи військову промисловість, сферу приладобудування, картографування та наукові дослідження.

Застосування цієї системи керування може бути важливим як у військовому, так і у цивільному секторах. Наприклад, використання малогабаритних підводних апаратів із вбудованою камерою, яка передає зображення на екран, може

допомогти у пошуку місць розташування риби, виявленні затонулих об'єктів та вирішенні інших завдань.

Різноманіття потенційних користувачів може знаходити вигідні умови для успішного впровадження цієї системи в різних сферах діяльності.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів (табл. 4.2) [34].

Таблиця 4.2. Визначення сильних та слабких характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Луч	Артем			
1	Вартість досліджень	900 ум.од.	1250 ум.од.	1400 ум.од.			+
2	Запас стійкості	64,7°	51,3 °	49,6°			+
3	Час перехідного процесу	3,15 с	2,89 с	3,47 с		+	
4	Простота	40%	10%	70%		+	
5	Точність	середня	висока	висока	+		

Висновки: Проведено порівняльний аналіз з двома потенційними конкурентами, визначеними у таблиці 4.2. Під час порівняння були виявлені як слабкі, так і сильні сторони проекту в порівнянні з конкурентами. З таблиці випливає, що проект має слабку сторону в точності роботи системи та часі перехідного процесу. Однак він відзначається перевагами у запасі стійкості та вартості проведення дослідження.

Для здійснення порівняння використовувались потенційні показники системи, враховуючи можливі покращення, які можна внести в систему на основі зібраних даних. Аналіз показав, що, незважаючи на виявлені слабкі сторони, проект володіє важливим конкурентним перевагами у плані стійкості та ефективності витрат. Це відкриває можливості для подальшого вдосконалення та підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Технологічний аудит - це систематичний аналіз технологічних процесів та методів, що застосовуються на підприємстві чи в організації. Метою технологічного аудиту є оцінка ефективності виробничих процесів, ідентифікація

можливостей для оптимізації, а також визначення сильних і слабких сторін в галузі технологій [34].

В табл. 4.3 проводиться аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Збір даних о керуванні безпілотним підводним апаратом за наявності неконтрольованих збурень	Аналіз системи керування кутом курсу БПА	Наявна	Доступна
2		Розробка програмної моделі системи керування,	Наявна	Доступна
3		Моделювання системи керування за наявності параметричних та зовнішніх неконтрольованих збурень	Наявна	Доступна
4		Забезпечення показників якості керування кутом курсу	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Керування безпілотним підводним апаратом за наявності неконтрольованих збурень.				

Висновок: В результаті аналізу, представленого у таблиці 4.3, було визначено, що оптимальною технологією для синтезу системи керування та отримання даних про керування об'єктом за умови наявності збурень є використання програмного середовища. Цей підхід виявився менш витратним порівняно з проведенням реальних експериментів і, крім того, надає можливість адаптувати систему керування під будь-який підводний апарат, враховуючи його унікальні особливості.

Технології, необхідні для реалізації цієї системи керування, є доступними та наявними, що підтверджує можливість успішної реалізації даного проекту. Використання програмного середовища дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси, сприяючи оптимальній роботі системи керування в умовах різних збурень.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз проведено аналіз попиту по основним параметрам: кількість гравців, загальний обсяг продажу, динаміка ринку, наявність обмежень, рентабельність та специфічні умови ліцензування. Ці дані описані у таблиці 4.4 [34].

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап- проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, ум.од	2000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не існують
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25%

Висновки: Ринок виявляє помірну привабливість для введення продукту, оскільки відзначається помірною рентабельністю та обсягом продажів. Незважаючи на це, обмежень, пов'язаних із входженням на ринок, не існує завдяки особливостям товару. Конкурентна обстановка є оптимальною з участю трьох провідних гравців.

Ринок також відзначається високою рентабельністю у даній галузі. Всі ці чинники створюють сприятливі умови для успішного впровадження продукту, забезпечуючи перспективи стійкого росту та прибутковості від його участі на даному ринку.

Для отримання більш детального уявлення про ринкову ситуацію, визначимо потенційні групи клієнтів (див. табл. 4.5), охарактеризуємо їхні особливості та розробимо орієнтований перелік вимог до продукту для кожної з цих груп [34].

Таблиця 4.5. 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	Системи для проведення картографування акваторії для якісного проектування	Будівельні компанії	Полегшення задачі обстеження рельєфу дна	Керованість, точність, надійність, адаптивність, швидкість відпрацювання
2	Системи для задоволення потреб в постійному визначення екологічного стану води	Екологія	Збільшення обсягів роботи, які апарат здатен виконувати в напівавтоматичному режимі	Керованість, точність, надійність, адаптивність, швидкість відпрацювання
3	Системи для пошуку об'єктів, для бойового чергування	Військове застосування	Керованість системи	Керованість, точність, надійність, адаптивність, швидкість відпрацювання

Висновки: Були визначені основні цільові сегменти ринку, зокрема військовий, приладобудування та наукові дослідження (екологія), разом з їхніми головними особливостями. Виявлені відмінності в потребах щодо системи керування для цих різних груп аудиторії. Крім того, визначено основні вимоги до системи керування (товару), а саме керованість, точність, надійність, адаптивність та швидкість відпрацювання.

Військовий сегмент вимагає високої стійкості та точності, здатності пристосовуватися до різних умов бойових операцій. Приладобудування віддає перевагу швидкості відпрацювання та адаптивності, щоб враховувати різноманітні технічні вимоги. У наукових дослідженнях, зокрема в екології, важливою є надійність та точність для збору даних.

Збирані дані надають можливість розглядати можливості покращення системи керування, зосереджуючись на вдосконаленні керованості, точності, надійності, адаптивності та швидкості відпрацювання, щоб відповідати унікальним вимогам кожного з цих цільових сегментів.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища, які сприяють впровадженню проекту, та факторів, які його ускладнюють. Для цього складено відповідні таблиці

факторів (табл. 4.6, табл. 4.7) [34]. Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Програмне забезпечення системи керування	Поява кращого програмного забезпечення для дослідження	Перехід на новіші версії програмного забезпечення
2	Технологічний	Розповсюдженість систем керування в умовах неконтрольованих збурень	Зміна вектору досліджень
3	Конкуренція	Поява конкурентоспроможних фірм	Покращення характеристик системи отримання даних
4	Якість	Невдоволення якістю отриманих даних	Покращення системи збору інформації до рівня необхідного користувачу
5	Актуальність даних	Застарівання зібраних даних	Проведення додаткових досліджень

Висновки: У таблиці 4.6 описані основні види загроз, серед яких однією з найбільш ймовірних є зростання конкуренції. Однак, забезпечивши покращення характеристик системи отримання даних, зазначена загроза може бути уникнена. Інші загрози також мають велике значення, і їх слід враховувати, оскільки їхні наслідки можуть призвести до відмови від використання отриманих в дослідженні даних.

Зокрема, покращення системи отримання даних може включати в себе заходи, спрямовані на підвищення ефективності, надійності та адаптивності. Це дозволить компанії бути більш конкурентоспроможною, зберігаючи свою позицію в умовах зростання конкуренції.

Загрози, визначені в таблиці, можуть бути ретельно враховані та вирішені за допомогою стратегій ризик-менеджменту, що дозволяє забезпечити стійкість та успішність проекту в умовах непередбачених викликів [34].

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Дешевше використання програмного продукту	Оптимізація витрат на програмне забезпечення для системи керування завдяки покращенням на основі отриманих даних.	Маркетинг з фокусом на потенційну економію для клієнтів
2	Нові групи клієнтів	Збільшення груп клієнтів, які зацікавлені у використанні зібраних даних	Оцінити вимоги потенційних нових клієнтів
3	Зростання попиту	Підвищення привабливості наших зібраних даних для розширення бази користувачів і залучення нових фірм	Розширення типів систем, які можуть бути покращені завдяки зібраним даним
4	Необхідність модифікацій	Необхідність у вдосконаленні та розширенні функціональних можливостей системи збору інформації	Розширення функціоналу та режимів роботи системи
5	Необхідність до клієнтоорієнтації	Давати можливість клієнтам замовляти дані по окремим дослідженням збурень.	Аналіз можливих ризиків

Висновки: У таблиці 4.7 подані ключові можливості, серед яких основною є зростання попиту, що призведе до збільшення користувачів, які будуть замовляти збір даної інформації. Це відкриває перспективи для розширення функціоналу та зниження цін на пакети досліджень, що проводяться з метою збору необхідної інформації для клієнтів. Потенційні фактори також можуть призвести до покращення якості та ефективності системи збору інформації. Збільшення попиту створює можливість для розширення бізнесу та приведення до зростання обсягів замовлень. Розширення функціоналу та зниження цін на пакети досліджень може зробити послуги більш доступними та привабливими для різних клієнтів. Паралельно потенційні фактори можуть допомогти підвищити якість та ефективність системи, що є важливим для задоволення різноманітних потреб користувачів та утримання конкурентоспроможності на ринку.

Надалі проведено аналіз пропозиції (табл. 4.8), де було визначено загальні риси конкуренції на ринку [34].

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: чиста конкуренція	низький рівень конкурентної боротьби	Більша клієнт орієнтованість з фокусом на більш індивідуальні дослідження від клієнтів
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Даний продукт користується широким попитом у багатьох розвинених країнах	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Продукт використовується в різних галузях, як мирних цілях, так і в військових	Оцінка змін у потребах кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду	Забезпечення відповідності продукту ринковим вимогам та задоволення потреб клієнтів
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Конкуренція в більшості своїй полягає в якості товару і його цінності для потенційних клієнтів	Покращення системи збору інформації для отримання більш якісних даних
6. За інтенсивністю: марочна	Вирішальним є конкретний бренд, адже він напряду впливає на довіру клієнтів до товару	Залежить від якості продукту, маркетингу та часу, який товар є на ринку

Висновки: Під час аналізу конкурентної обстановки на ринку були визначені ключові характеристики конкуренції та їх вплив на діяльність підприємства. Зазначено, що ринок характеризується невеликою конкуренцією, де основна боротьба відбувається між аналогічними товарами. Виявлені можливості для міжнародного розширення та використання продукту у різних сферах. Довіра до товару будується завдяки його високій якості, оскільки кількість підприємств, що виготовляють аналогічний товар, обмежена. Це створює перевагу для підприємства на ринку, де споживачі віддають перевагу надійності та якості. Така ситуація визначає можливості для успішного позиціонування та конкурентоспроможності, особливо за умови, що підприємство здатне вдало експлуатувати свою унікальність та якість продукту.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі [34].

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки: Ринок не досягнув насичення пропозиціями. Однією з труднощів є пошук перших замовлень.	Прямі конкуренти на даний момент не наявні	Можливість виходу на ринок присутня, терміни виходу – до 6 місяців	Постачальники не можуть на даний момент визначати ціни на ринку	Так, ринок більшою мірою залежить від умов клієнтів через свою нішову позицію.	Відсутні через певну унікальність товару

На основі аналізу конкуренції, проведеного наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, що наведені в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз наведено в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Точність зібраних даних
2	Простота	Простота для розуміння пакету звіту з зібраними даними
3	Адаптивність	Можливість гнучкого налаштування під бажання клієнту отримати конкретні спостереження
4	Готовий алгоритм	Зменшення часу очікування для покупця
5	Обслуговування	Потреба в консультації з технічних питань щодо отриманих даних

Висновки: Для підвищення надійності системи важливо використовувати алгоритми з високою точністю, щоб забезпечити збір більш точних даних. Простота у використанні та налаштуванні отриманих даних робить їх більш привабливими для клієнта, оскільки необхідно витратити мінімум часу на їх обробку та використання. Адаптивність та простота відкривають широкий спектр можливостей для потенційних замовлень від клієнтів.

Забезпечення легкості взаємодії з системою та швидкого доступу до важливих даних сприяє зручності користувачів і може стимулювати їхній інтерес у використанні продукту. Такий підхід сприяє покращенню якості обслуговування та може створити додаткові можливості для розвитку та розширення бізнесу.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11) [34, 35].

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	19						+2	
2	Простота	18				0			
3	Адаптивність	18						+2	
4	Готовий алгоритм	16		-2					
5	Обслуговування	18						+2	

Висновки: Засновуючись на факторах конкурентоспроможності (табл. 4.11) та підсумовуючи рейтинг товару в порівнянні з головним конкурентом, запропонована система виявляється з більш високим рейтингом в порівнянні з прямими конкурентами. Представлена таблиця конкретизує особливості, які роблять розроблену систему унікальною та в якому напрямку саме вона відрізняється від аналогів.

Детальний аналіз вказує, що сильними сторонами системи є висока надійність та гнучкість у можливості адаптації. Ці особливості, ймовірно, надають конкурентну перевагу, забезпечуючи користувачам надійність в роботі та здатність ефективно пристосовуватися до різних умов або потреб ринку. Це може впливати на позитивне сприйняття продукту і підтримку його конкурентоспроможності.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведено в таблиці 4.12 на основі виділених ринкових загроз та можливостей та сильних і слабких сторін в таблиці 4.11 [34].

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Простота використання. 2. Адаптивність. 3. Простота. 4. Універсальність. 5. Клієнт орієнтованість.	Слабкі сторони: 1. Низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя.
Можливості: 1. Вихід на міжнародний ринок. 2. Збільшення попиту. 3. Необхідність до модифікацій. 4. Освоєння нових сфер. 5. Індивідуальне замовлення.	Загрози: 1. Поява схожих систем. 2. Кваліфікованість спеціалістів. 3. Зниження актуальності даних. 4. Недостатній рівень якості.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13) [34].

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Висока	3міс
2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Середня	1міс
3	Суперництво	Нижче середнього	6міс.

Висновки: Результати аналізу призвели до вибору кооперації як альтернативної ринкової стратегії. Це обрано через те, що відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів. Кооперація може виявитися вигідною стратегією для швидкого та ефективного отримання необхідних ресурсів, спільної розробки інновацій або здійснення спільних проектів. Це також може допомогти вирішити питання обмежених ресурсів та збільшити конкурентоспроможність на ринку. Важливим є також те, що обрана стратегія кооперації може сприяти розвитку партнерських відносин, обміну досвідом та ресурсами, що в свою чергу може сприяти швидкому розвитку та успіху в обраному напрямку.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп споживачів (табл. 4.14) [34].

Таблиця 4.14. 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	Будівництво інженерних споруд(будинків, мостів)	+	+	низька	+
2	Охоронні установи	-	+	низька	-
3	Дослідницькі лабораторії	+	+	висока	+
4	Державні установи	+	+	висока	+
5	Риболовецькі організації	+	+	низька	-
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралося в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Будівельні компанії потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішної реклами є можливість зайняти нішу.					

Висновки: За результатами оцінки були визначені групи, які вимагають негайної реакції та відповідного швидкого оцінювання даних для подальшого впровадження рішень. З таблиці 4.14 видно, що обрані клієнти виявили потребу у відомостях та рішеннях, але водночас проявляють небажання витратити на це гроші та мають нерозуміння щодо того, на що це їм необхідно.

Це вказує на важливість швидкої та ефективної комунікації з цими клієнтами, щоб вирішити їхні сумніви та підтримати їхній інтерес до отримання відомостей та рішень. Систематичні та зрозумілі пояснення, як вони можуть виграти від використання цих рішень, можуть допомогти подолати їхні сумніви та стимулювати бажання вкладати в дані рішення.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Покращення якості продукту для отримання якісної переваги над конкурентами	Стратегія спеціалізації	Адаптація до вимог ринку, Клієнт орієнтованість	Стратегія диференціації

Висновки: Обираючи стратегію охоплення ринку, було прийнято рішення взяти за основну стратегію спеціалізації, оскільки продукт володіє високою унікальністю.

Стратегія спеціалізації дозволяє підприємству сконцентруватися на створенні та пропозиції унікального продукту, який відповідає конкретним потребам та очікуванням цільової аудиторії. Висока унікальність продукту може служити ключовим фактором витіснення конкурентів та привертання уваги клієнтів.

Ця стратегія може також дозволити ефективно використовувати ресурси, оскільки унікальний продукт може визначити особливий сегмент ринку. При правильному впровадженні, стратегія спеціалізації може призвести до стабільної позиції на ринку та підвищення конкурентоспроможності.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) [34].

Таблиця 4.16. 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	Є першопрохідцем	Шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде вдосконалювати наявний системи збору інформації	Стратегія зайняття конкурентної ніші

Висновок: Обираючи стратегію для проекту, який є першопрохідцем і не має прямих конкурентів, обрання стратегії зайняття конкурентної ніші є логічним та обґрунтованим вибором. Умови слабкої конкуренції, а також потенціал отримання стабільного потоку клієнтів та побудови репутації роблять цю стратегію

привабливою. Зайняття конкурентної ніші дозволяє фокусуватися на унікальних особливостях продукту та відповідати конкретним потребам обмеженої, але цільової аудиторії. Це може стати перевагою у майбутньому, оскільки дозволяє побудувати сильний бренд та стати експертом в обраній ніші.

Зазначена стратегія також дозволяє зробити значний внесок у формування ринкових стандартів та стати лідером у вибраній області, що є важливим перевагою для подальшого розвитку компанії.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 4.17) [34].

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Швидкість роботи	Стратегія спеціалізації	Швидкість отримання даних	Високошвидкісна, надійна
2	Можливість до широкого аналізу	Стратегія спеціалізації	Клієнт орієнтованість	Здатна до зборі широкого спектру даних
3	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	Високоточна

Висновки: Обрана стратегія зайняття конкурентної ніші є визначальною для подальшого розвитку проекту та отримання прибутку, який можна буде реінвестувати у сам проект та придбання нових технологій для їхньої подальшої інтеграції. Як виокремлено, стратегія фокусується на сильних сторонах проекту, таких як швидкість, якість та орієнтація на клієнта.

Швидкість реакції на ринкові вимоги, висока якість продукту та акцент на клієнторієнтованості можуть стати ключовими конкурентними перевагами у вибраній ніші. Зосередження на цих аспектах дозволяє проекту створити унікальну пропозицію, яка може привертати увагу та задовольняти потреби конкретної аудиторії.

Розвиток інфраструктури та придбання нових технологій також сприятиме зміцненню позицій на ринку і підвищенню конкурентоспроможності, а отже, збільшить можливість залучення нових клієнтів та розширення впливу проекту на ринку.

4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту та бізнес-моделі стартап-проекту

Маркетингова концепція товару є першим кроком до формування ідеї яку отримує споживач, наведено у таблиці 4.18 [34].

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність швидкого спектрального аналізу при наявності збурень	Якісний та швидкий аналіз	Ціна, надійність, простота, підтримка, обслуговування, універсальність
2	Виконання індивідуальних заказів на дослідження окремих чинників	Повний функціонал та гнучкість виконання завдань	Ціна, надійність, простота, підтримка, обслуговування, універсальність

Висновки: Результати оцінки маркетингової концепції вказують на можливість створення двох цільових аудиторій для подальших рекламних кампаній. Ця стратегія може допомогти максимізувати ефективність маркетингових зусиль та залучення уваги різних сегментів аудиторії.

Об'єднання цих двох цільових аудиторій в одну може стати додатковою можливістю для уніфікації бази клієнтів. Це може полегшити управління та взаємодію з клієнтами, спростити маркетингові зусилля та створити більш консолідований підхід до обслуговування клієнтів.

Важливо при цьому враховувати, що об'єднання цільових аудиторій повинно враховувати їхні унікальні потреби та очікування, щоб забезпечити ефективне спілкування та задоволення їхніх вимог.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару (табл. 4.19) [34, 35].

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Дані надають можливість розробити більш досконалі системи керування підводними автономними апаратами в умовах некерованих збурень.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Адаптивність	Нм	Тх
	Швидкість роботи	Нм	Тх
	Точність	Нм	Тх
	Надійність	Нм	Тх
	Вартість	М	Е
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація IEEE.		
	Пакування: -		
Марка: -			
III. Товар із підкріпленням	Обслуговування клієнта при подальшій співпраці.		
	Цілодобова технічна підтримка пов'язана з наданими даними та їх обробкою.		
Захист товару проводиться шляхом заключення договорів о нерозголошенні отриманих від компанії даних для сповільнення розповсюдження інформації між компаніями.			

Висновки: Основними засобами захисту наданих даних є ліцензійне право, яке за законом надає можливість максимально ускладнити витік зібраних даних. Для ефективного застосування цього механізму захисту рекомендується розглядати можливість додаткових витрат на залучення кваліфікованого фахівця для компанії. Цей фахівець буде відповідальний за правильне впровадження та управління ліцензійними аспектами, забезпечуючи надійний захист конфіденційної інформації.

Постійний аналіз новітніх технологій є необхідною складовою для утримання високого рівня безпеки та захисту даних. Цей процес допомагає уникнути відставання від реалій ринку та забезпечує вчасне виявлення та впровадження передових методів захисту.

Технічна підтримка також має важливе значення для утримання частини клієнтів. Забезпечення стабільної та безпечної роботи системи через технічну підтримку допомагає зберігати довіру клієнтів та підтримувати позитивне сприйняття бренду компанії.

Наступним кроком визначимо цінові межі (табл. 4.20) [34].

Таблиця 4.20. 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	20000 у.о.	25000 у.о.	100000 у.о.	15000-30000 у.о.

Висновки: Враховуючи специфіку даного товару, стратегія продажу звітів зі зібраними даними окремим компаніям за певну суму грошей та подальше обслуговування клієнтів, що придбали цю послугу, виглядає як більш вигідний та раціональний підхід. Такий підхід може допомогти стабільно отримувати прибуток та розвивати довгострокові відносини з клієнтами.

Постійний пошук нових клієнтів для отримання та закриття різних замовлень також має сенс, оскільки це сприяє розширенню клієнтської бази та можливостям збільшення обсягів продажів. Залучення нових клієнтів може забезпечити стійкий потік прибутку та додаткові можливості для росту бізнесу.

Загалом, комбінація продажу послуг та постійного розширення клієнтської бази може допомогти забезпечити стабільний фінансовий ріст та успішну діяльність даного бізнесу.

Визначимо оптимальну систему збуту, в межах якого будуть прийматися ті чи інші рішення(табл. 4.21) [34].

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Одноразовий продаж	Продаж готового звіту з отриманими даними	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
2	Підписка на технічну допомогу	Оформлення підписки для підтримки в опрацюванні та впровадженні змін на основі звіту	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: Впровадження ефективної системи оформлення підписки вважається перспективним підходом, оскільки вона допоможе утримувати клієнтів в компанії і постійно розширювати базу клієнтів. Цей метод сприяє збереженню стабільного потоку прибутку та забезпеченню довгострокових відносин з клієнтами, що може бути ключовим для успіху бізнесу.

Прямий продаж звітів з даними також може сприяти стрімкому розвитку навичок співробітників через велику кількість виконаних робіт та широкий спектр завдань. Це може допомогти підвищити ефективність роботи командита допомагати усуненню можливих труднощів через різноманітність проектів.

Загалом, комбінація обох підходів може стати сильною стратегією для компанії, забезпечуючи не лише стабільність утримання клієнтів, але й активне розширення можливостей для росту та розвитку.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 22) [34, 35].

Таблиця 4.22. 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	Обставини змушують клієнта шукати способи отримання даних для покращення підводного робота	Цільова реклама в соц. мережах. Участь у наукових конференціях для знаходження спонсорів	Висока швидкість роботи Надійність Якість	Показати якість отриманих даних та швидкість отримання результатів	Показ зручності та можливості роботи з отриманими даними

Висновки: Використання різних каналів розміщення рекламних об'яв включає в себе такі платформи, як Facebook Ads, Google Ads, TikTok і LinkedIn. Цей різноманітний підхід дозволяє максимально охопити різні сегменти цільової аудиторії та сприяє розширенню видимості продукту. Здійснення маркетингових заходів на важливих онлайн-платформах, таких як Facebook і Google, може сприяти широкому розповсюдженню і підвищенню уваги до продукту. Використання TikTok може бути ефективним для залучення молодіжної аудиторії, в той час як LinkedIn може бути корисним для просування в бізнес-середовищі. Участь у наукових конференціях та представлення результатів досліджень може позначитися як серйозним підходом до розвитку продукту та підвищити його авторитет у наукових колах. За вказівкою на те, що цільова аудиторія повинна бачити швидкість та можливості системи менше ніж за одну хвилину, слід

зосередити зусилля на створенні візуально привабливого та короткого контенту, який ілюструє основні переваги продукту.

Бізнес-модель стартап-проекту поділено на декілька пунктів, а саме: ключові партнери, ключова діяльність, ключові ресурси, ціннісна пропозиція, відносини з клієнтами, канали, сегменти користувачів, структура витрат, джерела доходів[35].

Таблиця 4.23 Бізнес-модель стартап-проекту

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Взаємодія з клієнтами	Сегменти споживачів
Ключовими партнерами є компанії, які виготовляють безпілотні підводні апарати і які можуть бути зацікавлені в партнерстві	Дослідження поведінки систем керування підводними безпілотними апаратами в умовах наявності неконтрольованих збурень.	Отримання даних для покращення роботи підводних дронів в умовах збурень	Через пряме спілкування чи з використанням електронної пошти	Споживачами виступають фізичні та юридичні особи, які мають потребу в проведенні досліджень системи керування в умовах некерованих збурень з метою отримання даних.
	Ключові ресурси	Канали збуту		
	Спеціалісти, які здатні виконувати, аналізувати дані та покращувати систему збору даних.	Прямі канали спілкування з клієнтами		
Структура витрат		Потоки доходів		
Є висококваліфіковані спеціалісти, обладнання для проведення досліджень.		Контракти від клієнтів, підписка на постійну техпідтримку		

Висновок: Орієнтація проекту на нішеву аудиторію і подальше обговорення бажань клієнтів по інтеграції покращень на основі отриманих даних в систему керування є стратегічно обґрунтованим підходом. Це надає можливість гнучкості та персоналізації взаємодії з кожним клієнтом. Важливим елементом такої стратегії є здатність змінювати ціни відповідно до конкретних потреб клієнта та можливостей компанії їх задовольнити. Це стимулює взаємодію з клієнтами, сприяє уточненню їхніх очікувань та веде до постійного вдосконалення продукту чи послуги. Такий підхід може позитивно вплинути на розвиток бізнесу, оскільки забезпечує адаптацію до індивідуальних потреб клієнтів, збільшує рівень задоволення від користування продуктом та створює позитивний імідж компанії в очах своєї цільової аудиторії.

Висновки до розділу 4

1. У даному розділі досліджується стратегія позиціонування стартапу з орієнтацією на монетизацію теми дипломної роботи. Основний акцент робиться на зборі даних щодо поведінки системи керування безпілотним підводним апаратом в умовах некерованих збурень та на подальшому їхньому продажу компаніям, зацікавленим у цих даних.

2. Стратегія передбачає вивчення ринкової цінності та попиту на отримані дані, створюючи можливість для стартапу генерувати доходи через їх комерціалізацію. Продаж отриманих даних компаніям, які зацікавлені у вдосконаленні своїх технологічних рішень або розробці нових продуктів, може стати ключовим джерелом прибутку.

3. Підхід передбачає активне дослідження ринку, аналіз потреб потенційних клієнтів та розробку ефективної стратегії продажу отриманих даних. Також може знадобитися встановлення партнерських відносин з компаніями, які виявляють зацікавленість у цих даних, для стабільного входження на ринок та успішної монетизації продукту.

4. В якості результату було представлено бізнес-модель стартап-проекту (табл. 4.23), в якому наглядно видно всю необхідну інформацію для якісної оцінки інвестиційного потенціалу даного проекту.

ВИСНОВКИ

1. В результаті огляду стану проблеми було встановлено, що не зважаючи значний науковий і практичний інтерес до розробки та вдосконалення систем керування АБПА, все ще недостатньо вирішеною є проблема врахування впливу на неї несприятливих умов, обумовлених дією зовнішнього середовища та похибок роботи датчиків інформації. Для вирішення цієї проблеми запропоновано провести дослідження роботи системи керування за умови дії на неї зовнішніх неконтрольованих та параметричних збурень.

2. Було проведено аналіз системи керування кутом курсу АБПА. Описано її структурну схему та принцип роботи. Наведено рівняння динаміки кожного з елементів системи, визначено передатні функції та необхідні для них параметри. Також систему перевірено на стійкість. Проведено аналіз функціональних елементів системи, необхідних для проведення дослідження. В якості датчиків інформації системи обрано МЕМС пристрої. Було запропоновано уточнити характеристики наявних в системі керування ідеальних ланок, врахувавши у моделях наявність шкідливих впливів детермінованих завад, похибок та шумів, які можуть виникати у реальній системі. Визначено шумові складові, які виникають у датчиках. Методом варіацій Аллана було визначено шумові характеристики МЕМС гіроскопів ADXRS610 та LCG50-00500-100 для подальшого використання цих значень у моделюванні. Впливу шуму датчиків запропоновано моделювати білим шумом. Також запропоновано моделі впливу зовнішніх неконтрольованих збурень системи, спричинених несприятливими умовами зовнішнього середовища.

3. На основі запропонованої структурної моделі побудовано Simulink модель системи керування кутом курсу АБПА. Дана модель спроектована з урахуванням можливості впливу на неї параметричних та неконтрольованих зовнішніх збурень. Розроблено методику моделювання системи керування, за допомогою якої можна поетапно визначити впливи різних збурень на якість роботи системи керування курсом. У відповідності з визначеними у методиці параметрами було проведено моделювання роботи системи керування.

4. Відповідно до отриманих результатів моделювання було проведено аналіз динамічних характеристик системи керування та показників якості керування кутом курсу. Встановлено, що за відсутності зовнішніх збурень система коректно відпрацьовує заданий курс. Визначено вплив шуму датчиків інформації в системі. Величина похибки відпрацювання системи керування пропорційна шумовим характеристикам датчиків. Також визначено, що, за даної конфігурації системи, шуми від кожного з датчиків однаково впливають на якість роботи системи. При заданих параметрах шуму похибка керування становить 0.25° . За результатами дослідів впливу ударного навантаження, згасаючого коливального навантаження та хитавиці можна зробити висновок, що система здатна відпрацьовувати зовнішні збурення, встановлено пряму залежність часу відпрацювання системи від амплітуди зовнішнього збурення. Показано, що при дії гармонічного збурення система керування постійно відпрацьовує це збурення та не може налаштуватись на заданий курс. Моделювання сумарного впливу шуму датчиків та зовнішніх збурень показує, що система керування може працювати в таких умовах.

5. Після проведення аналізу встановлено наступні негативні фактори роботи системи: наявність невеликої постійної похибки регулювання при відпрацюванні зміни заданого значення; проблема постійного відпрацювання похибок корекції від шумів та невеликих постійних збурень. Для забезпечення кращих показників якості керування запропоновано використання фільтрів у системі керування. Для усунення похибки відпрацювання запропоновано провести налаштування режимів роботи системи керування та провести компенсацію похибок у відповідності до кожного режиму. Також можна провести налаштування параметрів системи керування.

6. Також за темою роботи було розроблено стартап-проект, в якому було проведено аналіз ринкових можливостей, технічний аудит проекту. Розроблено ринкову стратегію, маркетингову програму та бізнес-модель проекту. Це продемонструвало готовність стартап-проекту до впровадження на ринок та стабільного розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Allard Y. Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information / Y. Allard, E. Shahbazian. // OODA Technologies Inc.. – 2014.
2. What are underwater ROVs & what can they be used for? [Електронний ресурс] // Reach Robotics. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://reachrobotics.com/blog/what-is-an-underwater-rov/>.
3. Autonomous Underwater Vehicle [Електронний ресурс] // Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition). – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/autonomous-underwater-vehicle>.
4. J. Wang, Z. X. Wu, H. J. Dong, M. Tan, and J. Z. Yu, “Development and control of underwater gliding robots: A review,” IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 9, no. 9, pp. 1543–1560, Sept. 2022. doi: 10.1109/JAS.2022.105671
5. Гуриненко С. Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів / Станіслав Гуриненко. // конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». – 2021. – С. 34–37.
6. Deutsch, C.; Moratelli, L.; Thune, S.; Kutteneuler, J.; Soderling, F. Design of an AUV Research Platform for Demonstration of Novel Technologies. In Proceedings of the 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 6–9 November 2018.
7. Andersson M. Automatic Tuning of Motion Control System for an Autonomous Underwater Vehicle / Andersson Markus – Linköping, Sweden, 2019. – 95 p.
8. Rout R. Control of Autonomous Underwater Vehicles / Rout Raja – National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, 2012. – 91 с.
9. Сапегін О. М. Вдосконалення методів і алгоритмів визначення параметрів орієнтації для безплатформної інерціальної навігаційної системи: дис. канд. техн. наук / Сапегін Олександр Миколайович – Київ, 2021. – 227 с.
10. Busquets, Javier & Busquets-Mataix, J. & Tudela, Dionisio & Perez, Francisco & Busquets-Carbonell, Jesus & Barbera, Alvaro & Rodriguez, Carlos & Garcia-

- Sanchez, Antonio-Javier & Gilabert, Javier. (2012). Low-cost AUV based on Arduino open source microcontroller board for oceanographic research applications in a collaborative long term deployment missions and suitable for combining with an USV as autonomous automatic recharging platform. 1-10. 10.1109/AUV.2012.6380720.
11. Analog Devices ADXL345 Data Sheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>.
 12. ITG-3200 Product Specification Revision 1.4 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf>.
 13. Lei W., Fang W. Modeling and Motion Control Strategy for AUV. // Autonomous Underwater Vehicles / , 2011. – (IntechOpen). – p. 133–146.
 14. Matthew Kokegei, Fangpo He and Karl Sammut. Fully Coupled 6 Degree-of-Freedom Control of an Over-Actuated Autonomous Underwater Vehicle. // Autonomous Underwater Vehicles / , 2011. – p. 148–170.
 15. Antonov D., Kolganov L. Navigation and motion control systems of the autonomous underwater vehicle. // EUREKA: Physics and Engineering. – 2020. – №4. – p. 38–50.
 16. I.Masmitja, G. Masmitja, J. González. Development of a Control System for an Autonomous Underwater Vehicle. // IEEE Xplore. – 2010.
 17. Бурай Н.І. Аналіз систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотного підводного апарата зі складною динамікою руху / Н. Бурай, С. Гуриненко. // Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2023. – №1. – С. 12.
 18. Andrew Lammas, Karl Sammut and Fangpo He (2010). 6-DoF Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles, Mobile Robots Navigation, Alejandra Barrera (Ed.), ISBN: 978-953-307-076-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/mobile-robots-navigation/6-dof-navigation-systems-for-autonomous-underwater-vehicles>.

19. Гуриненко, С., Бурау, Н. (2023). Огляд математичних та алгоритмічних методів систем автоматичного керування багатоцільового автономного безпілотною підводного апарата із складною динамікою руху. *Measuring and computing devices in technological processes*, (2), 42–48. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-6>.
20. Бобрик, В. С. Система керування безпілотним підводним апаратом : магістерська дис. :151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Бобрик Владислав Сергійович. – Київ, 2018. – 100 с.
21. Михайловський В. Моделювання впливу шуму датчиків інформації в системі керування підводним апаратом / Віталій Михайловський. // Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні. – 2023.
22. Gutkoski E. Noise modeling in low-cost MEMS IMU sensors using experimental data / Eduardo Gutkoski. – 2022. – С. 71.
23. Mohd-Yasin, F., Nagel, D. J., and Korman, C. E., “Topical Review: Noise in Mems”, *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 1, 2010. doi:10.1088/0957-0233/21/1/012001.
24. Клименко А. Фільтрація сигналів чутливих елементів систем орієнтації і навігації / Анастасія Клименко. – 2020. – С. 92.
25. Accelerometer Specifications: Measurement Range, Sensitivity, and Noise Performance [Електронний ресурс] // All About Circuits. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/accelerometer-specifications-measurement-range-sensitivity-and-noise-performance/>.
26. Accelerometer Specifications: Deciphering an Accelerometer's Datasheet [Електронний ресурс] // enDAQ blog. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://blog.endaq.com/accelerometer-specifications-decoding-a-datasheet>.
27. Gill, W.A.; Howard, I.; Mazhar, I.; McKee, K. A Review of MEMS Vibrating Gyroscopes and Their Reliability Issues in Harsh Environments. *Sensors* 2022, 22, 7405. <https://doi.org/10.3390/s22197405>
28. Effa D. Design, Fabrication and Characterization of MEMS Gyroscopes Based on Frequency Modulation / Dawit Effa. – 2018. – С. 172.

29. Educational material. 3.1 IMU Specifications [Електронний ресурс] // VECTORNAV – Режим доступу до ресурсу: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications--and--error-budgets/specs-imuspecs>.
30. Hussein A. Low-Cost Inertial Sensors Modeling Using Allan Variance / A. Hussein, I. Jleta. // Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2015. – №5. – С. 1237–1242.
31. Новітні прилади орієнтації і навігації: Лабораторний практикум для студентів напряму підготовки 051003 «Приладобудування» спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації» приладобудівного факультету / Уклад.: О. І. Нестеренко, В. Є. Баланчук – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 74 с.
32. Analog Devices ADXRS610 datasheet [Електронний ресурс] // Analog Devices – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS610.pdf>.
33. Systron Donner LCG50 Low Cost Gyro [Електронний ресурс] // Systron Donner – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ray-q.ro/pdf/LCG50-00500-100.pdf>.
34. Розробка стартап-проектів: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 188 с.
35. Розробка стартап-проектів: практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційновимірвальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с.

ДОДАТОК А**СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**Михайловського В.В.

(Прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
1	МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ШУМУ ДАТЧИКІВ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ АПАРАТОМ	Збірник праць ХІХ Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» - Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 20-21 грудня 2023 року.	4	

Автор

(Підпис)

Михайловський В.В.

(Прізвище, ім'я, по батькові)

Зав. Каф. КІОНС

(Підпис)

Надія БУРАУ