

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

Приладобудівний
(повна назва інституту/факультету)

Приладів і систем орієнтації та навігації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 531.383

«До захисту допущено»

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

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

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

на тему: Мікромеханічна курсовертикаль з алгоритмом роботи на основі фільтра Калмана

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

Білоус Євген Іванович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н, доц. Нестеренко О. І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

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

Факультет (інститут) _____ Приладобудівний _____
(повна назва)

Кафедра _____ Приладів і систем орієнтації та навігації _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) _____ 151. «Автоматизація та комп'ютерно- _____
(код і назва)

інтегровані технології» («Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування») _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Н. І. Бурау _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ **Білоусу Євгену Івановичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації _____ Мікромеханічна курсовертикаль _____
_____ з алгоритмом роботи на основі фільтра Калмана _____
науковий керівник дисертації _____ Нестеренко Олег Іванович, к.т.н., доц. _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____ 14.05.2019 _____

3. Об'єкт дослідження _____ Алгоритм роботи безплатформної інерціальної _____
_____ курсвертикалі _____

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) _____ Вдосконалення алгоритму роботи _____
_____ БКВ та оцінка параметрів морської хвилі _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 5.1 Інформаційно-аналітичний огляд стану проблеми;
- 5.2 Аналіз сучасних методів алгоритмічної компенсації похибок та підвищення точності безплатформних систем орієнтації;
- 5.3 Вдосконалення алгоритму роботи БКВ;
- 5.4 Розробка алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань БКВ;
- 5.5 Експериментальна перевірка результатів дослідження.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу таблиці, графіки, рисунки.

7. Орієнтовний перелік публікацій 2 конференції, 1 стаття

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап проекту	Бояринова К. О., к.е.н., доц.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Інформаційно-аналітичний огляд стану проблеми	10.02.2019	
2	Аналіз сучасних методів алгоритмічної компенсації похибок та підвищення точності безплатформних систем орієнтації	24.02.2019	
3	Вдосконалення алгоритму роботи БКВ	17.03.2019	
4	Розробка алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань БКВ	31.03.2019	
5	Експериментальна перевірка результатів дослідження	28.04.2019	
6	Оформлення рукопису дисертації	12.05.2019	

Студент

(підпис)

Є. І. Білоус
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О. І. Нестеренко
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складає 102 сторінки, в ній містяться 28 ілюстрацій, 24 таблиці і 37 використаних джерел.

Актуальність: На сьогоднішній день актуальною є проблема точності оцінки орієнтації як наземних, так і повітряних та морських об'єктів. Важливою проблемою є вдосконалення існуючих та пошук нових методів алгоритмічної компенсації похибок та підвищення точності безплатформних систем орієнтації.

Мета: підвищення точності та компенсація похибок мікромеханічної безплатформної курсовертикалі шляхом удосконалення та оптимізації існуючих алгоритмів роботи БКВ.

Завдання:

1. Інформаційно-аналітичний огляд стану проблеми.
2. Аналіз сучасних методів алгоритмічної компенсації похибок та підвищення точності безплатформних систем орієнтації.
3. Вдосконалення алгоритму роботи БКВ.
4. Розробка алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань БКВ.
5. Експериментальна перевірка результатів дослідження.

Об'єкт: алгоритм роботи безплатформної інерціальної курсовертикалі.

Предмет: вдосконалення алгоритму роботи БКВ та оцінка параметрів морської хвилі.

Методи дослідження: Використано наукові методи прикладних досліджень, методи комп'ютерного та напівнатурного моделювання.

Наукова новизна:

1. Спрощено та перевірено модель вимірювання алгоритму БКВ з використанням ОФК.
2. Розроблено алгоритм оцінки параметрів морської хвилі на основі вимірювань БКВ.

Практичне значення: Запропонований алгоритм роботи БКВ може використовуватись в мікромеханічних системах орієнтації з ціллю оптимізації системи та підвищення її швидкодії; Розроблений алгоритм оцінки параметрів морської хвилі може застосовуватись в системах орієнтації та навігації на морських об'єктах, в системах моніторингу та передбачення погодних умов.

Апробація результатів дисертації (виступи на науково технічних конференціях):

1. XI Науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2018.
2. XII Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2019.

Публікації:

1. Білоус Є. І. Розробка алгоритму безплатформної інерціальної курсовертикалі на основі кватерніонних рівнянь з використанням фільтра Калмана / Є. І. Білоус, О. І. Нестеренко // Збірник статей XI Науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». – К.:ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 19-22.
2. Білоус Є. І. Спрощення моделі вимірювання в алгоритмі кватерніонного фільтра Калмана безплатформної курсовертикалі / Є. І. Білоус, О. І. Нестеренко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2019. – №1. – С. 52-58.
3. Білоус Є. І. Визначення параметрів хвилі інерціальним вимірювальним модулем / Є. І. Білоус, О. І. Нестеренко // Збірник тез доповідей XII Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». – К.:ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – С. 16.

Ключові слова: система орієнтації; курсовертикаль; кватерніон; фільтр Калмана; модель похибок; вектор вимірювання; параметри хвилі.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 102 pages, it contains 28 illustrations, 24 tables and 37 sources used.

Actuality: The problem of orientation estimation accuracy of ground, air and sea objects is actual for today. Also the improvement of existing and the search for new methods of algorithmic compensation of errors and increase the accuracy of strapdown orientation systems is an important problem.

Purpose: Accuracy improvement and errors compensation of strapdown MEMS AHRS by means of improvement and optimization of existing AHRS algorithms.

Task:

1. Information-analytical review of the problem.
2. Analysis of modern methods of algorithmic error compensation and accuracy improvement of strapdown orientation systems.
3. Improvement of the AHRS operation algorithm.
4. Development of the algorithm for estimating the sea wave parameters using the measurements of the AHRS
5. Experimental testing of research results.

Object: Strapdown attitude and heading reference system algorithm.

Subject: Improvement of the AHRS operation algorithm and estimation of sea wave parameters.

Methods of research: Scientific methods of applied researches, methods of computer and semi-natural modeling are used.

Scientific novelty:

1. Simplified and tested AHRS measurement model using Kalman filter.
2. The algorithm of estimation of sea wave parameters using AHRS measurements is developed.

Practical significance: The proposed AHRS operation algorithm can be used in MEMS orientation systems with the aim of optimizing the system and increasing its speed;

The developed algorithm for estimating sea wave parameters can be used in orientation and navigation systems on marine objects, in monitoring systems and weather forecasting.

Approbation of the results of the dissertation (presentations at scientific and technical conferences):

1. XI Scientific-practical conference of students and postgraduates "A View to the Future of Instrumentation", Kyiv, 2018.
2. XII Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "A View to the Future of Instrument making", Kyiv, 2019.

Publications:

1. Bilous Y. I. The development of a strapdown inertial AHRS algorithm based on quaternion equations using the Kalman filter / Y. I. Bilous, O. I. Nesterenko // A collection of articles of the XI Scientific and practical conference of students and postgraduates "A View to the Future of Instrument Making". – K : PBF, Igor Sikorsky KPI. – 2018. – P. 19-22.
2. Bilous Y. I. Simplification of the measurement model in algorithm of the strapdown attitude and heading reference system based on the quaternion Kalman filter / Y. I. Bilous, O. I. Nesterenko // KPI Science News. – 2019. – vol. 1. – P. 52-58.
3. Bilous Y. I. Determination of wave parameters by inertial measuring module / Y. I. Bilous, O. I. Nesterenko // A collection of articles of the XII Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "A View to the Future of Instrument making". – K : PBF, Igor Sikorsky KPI. – 2019. – P. 16.

Keywords: orientation system; AHRS; quaternion; Kalman filter; errors model; measurement vector; wave parameters.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	12
1.1 Аналіз проблем точності БКВ.....	12
1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок БКВ	17
1.3 Мета і завдання дослідження	21
РОЗДІЛ 2 БАЗОВИЙ АЛГОРИТМ РОБОТИ БКВ.....	22
2.1 Рівняння орієнтації з параметрами Родриго-Гамільтона.....	23
2.2 Похибки обчислення кутів орієнтації об'єкта БКВ.....	25
2.3 Рівняння похибок та модель стану БКВ	28
2.4 Модель вимірювань БКВ.....	30
2.5 Спрощення моделі вимірювань БКВ	32
2.6 Перевірка спостережуваності системи	36
2.7 Оцінка обчислювальних витрат одного кроку алгоритму ОФК.....	38
2.8 Оцінка і компенсація похибок системи за допомогою ОФК.....	38
2.9 Алгоритм початкової виставки БКВ	40
Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ БКВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОРСЬКОЇ ХВИЛІ	43
3.1 Визначення лінійних переміщень об'єкта в ГСК	43
3.2 Розрахунок параметрів морської хвилі.....	46
Висновки до розділу 3	50
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	51

4.1 Дослідження базового алгоритму роботи БКВ	51
4.2 Дослідження алгоритму визначення параметрів морської хвилі.....	58
Висновки до розділу 4	64
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «МІКРОМЕХАНІЧНА КУРСОВЕРТИКАЛЬ З АЛГОРИТМОМ РОБОТИ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА».....	65
5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології).....	65
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	68
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	69
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	77
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	82
Висновки до розділу 5	85
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	90
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	94
Додаток Б. Лістинг програми напівнатурного моделювання алгоритму БКВ на основі ОФК	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БІСО – безплатформна інерціальна система орієнтації

БКВ – безплатформна курсовертикаль

ГСК – географічна система координат

ДКШ – датчик кутової швидкості

МНК – матриця напрямних косинусів

ОФК – оптимальний фільтр Калмана

МПЗ – магнітне поле землі

ВСТУП

Безплатформні інерціальні системи орієнтації (БІСО) стали основою навігаційних комплексів сучасних рухомих об'єктів. Це обумовлено тим, що вони дають повну та точну інформацію про орієнтацію (кутове положення) об'єкта. При цьому вони повністю автономні, тобто не потребують інформації ззовні. Завдяки можливості визначати кутове положення об'єкта з високою точністю в будь-якому діапазоні кутів та з високою частотою видачі інформації, БІСО на даний час не мають альтернатив.

З появою на ринку мікромеханічних датчиків, стрімко зріс інтерес до малогабаритних, порівняно недорогих систем орієнтації з точністю, достатньою для вирішення ряду нових задач у різноманітних сферах застосування: в авіації та космонавтиці, судноплавстві (надводному і підводному), в об'єктах спеціальної техніки (малогабаритні безпілотні апарати, робототехніка, системи стабілізації та керування тощо). При цьому існує два підходи вирішення проблеми недостатньої точності мініатюрної системи орієнтації: компенсуванням її системами, побудованими на інших фізичних принципах, або розробленням алгоритмів підвищення точності з урахуванням специфіки застосування.

Дана робота присвячена алгоритмічному підходу підвищення точності, що передбачає оптимальну оцінку похибок з її подальшим компенсуванням. Також розглядається можливий варіант оптимізації та підвищення швидкодії одного з відомих алгоритмів реалізованих на основі оптимального фільтра Калмана та рівнянь орієнтації з параметрами Родриго-Гамільтона [1].

В магістерській дисертації також розглядається можливість застосування вимірювань БКВ для оцінки параметрів морської хвилі, що на сьогоднішній день може широко застосовуватись у системах орієнтації та навігації морських об'єктів, системах моніторингу, прогнозування та попередження екстремальних погодних умов.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

В даному розділі розглянуто основні проблеми точності сучасних безплатформних систем орієнтації зокрема безплатформної курсовертикалі (БКВ). Проведено огляд сучасних наукових робіт, присвячених дослідженню проблеми підвищення точності безплатформних систем орієнтації та пошуку нових методів компенсації існуючих похибок.

БКВ – гіроскопічний прилад, призначений для визначення кутів орієнтації (кути між географічною системою координат (ГСК) і зв'язаною з об'єктом системою координат), кутових швидкостей та прискорень рухомих об'єктів.

1.1 Аналіз проблем точності БКВ

Основними вимогами до сучасних безплатформних інерціальних систем орієнтації є:

- відносно невеликі габарити, маса й енергоспоживання;
- висока надійність і ремонтпридатність;
- універсальність системи (перехід до визначення тих або інших параметрів здійснюється алгоритмічно);
- висока точність визначення кутів орієнтації.

Підвищення точності вимірювання кутів орієнтації об'єкта можна досягти, по-перше, шляхом використання прецизійних датчиків, що в свою чергу супроводжується значним зростанням вартості й масо-габаритних властивостей системи, а по-друге – алгоритмічно, не змінюючи існуючої конструкції.

Слід зазначити, що наявні матеріали та дослідження теорії і алгоритмів безплатформних систем орієнтації містяться, в основному, в статтях, патентах, а

також в окремих монографіях по прикладній гіроскопії і теорії інерціальних систем орієнтації та навігації.

В традиційних безплатформних системах орієнтації основними датчиками є датчики кутової швидкості (ДКШ), інтегрування сигналів яких дозволяє визначити всі три кути орієнтації – кут курсу, тангажу й крену. Проте використання у якості ДКШ прецизійних гіроскопів не є доцільним, так як їх ціна занадто висока, а масо-габаритні характеристика в великій мірі обмежують область застосування таких систем. Саме тому найоптимальнішим рішенням є використання мікроелектромеханічних (MEMS) гіроскопів у якості датчиків кутової швидкості БКВ.

Для визначення кутів орієнтації об'єкта використовуються кінематичні рівняння орієнтації (рівняння Ейлера, Пуассона та кінематичні рівняння в кватерніонах), які розв'язуються шляхом інтегрування вихідних сигналів ДКШ [1]. Вагомими недоліками рівнянь Ейлера є нелінійність рівнянь орієнтації, та їх невизначеність при кутах тангажу $\theta = \pm 90^\circ$. Недоліком рівнянь Пуассона є необхідність інтегрування 9-ти диференціальних рівнянь та наявність шести рівнянь зв'язку матриці напрямних косинусів (МНК). Саме тому найпоширенішим у сучасній практиці є використання кватерніонних рівнянь орієнтації, перевагою яких є необхідність інтегрування лише 4-х рівнянь орієнтації та наявність лише одного рівняння зв'язку елементів кватерніону.

На практиці в сигналах ДКШ наявна не лише корисна складова (абсолютна кутова швидкість об'єкта) а і похибка (дрейф ДКШ). В результаті чого, при інтегруванні сигналів ДКШ, похибка оцінки орієнтації зростає у часі. Саме тому побудова безплатформних систем орієнтації на основі лише мікромеханічних ДКШ є неможливою. Оптимальним рішенням цієї проблеми є інтеграція ДКШ та позиційних датчиків (акселерометри та магнітометри) у єдину систему. Сигнали позиційних датчиків використовуються для реалізації корекції сигналів ДКШ.

На сьогоднішній день відомі наступні варіанти реалізації корекції БКВ:

- Пропорційна корекція;

- Постійна (релейна) корекція;
- Змішана (пропорційна та постійна) корекція;
- Пропорційно-інтегральна корекція;
- Корекція з використання комплементарних фільтрів
- Оптимальний фільтр Калмана.

Найпоширенішими варіантами реалізації корекції гіроскопів у мікромеханічних БКВ є застосування ОФК та комплементарних фільтрів.

Фільтр Калмана призначений для рекурсивного дооцінювання вектора стану апріорно відомої динамічної системи, тобто для розрахунку поточного стану системи необхідно знати поточне вимірювання, а також попередній стан самого фільтра. Таким чином, фільтр Калмана, подібно до інших рекурсивних фільтрів, реалізований в часовому, а не в частотному поданні, але на відміну від інших подібних фільтрів, фільтр Калмана оперує не тільки оцінками стану, а ще й оцінками невизначеності (щільності розподілу) вектора стану, спираючись на формулу Байєса умовної ймовірності [2].

На сьогоднішній день запропоновано ряд реалізацій ОФК в алгоритмах БКВ, що дозволяють оцінювати та компенсувати похибки визначення кутів орієнтації, зміщення нулів гіроскопів та зменшити вплив шумів датчиків. Фільтр Калмана як один із найвідоміших методів оптимальної оцінки, застосовувалися в багатьох галузях, особливо при побудові систем орієнтації та навігації літальних апаратів, в тому числі і космічних апаратів. У роботах [3]-[4] запропоновано стандартний кватерніонний алгоритм ОФК для визначення орієнтації з використанням 3-вісних датчиків кутової швидкості, акселерометра та магнітометра. Модель вимірювання лінеаризували шляхом обчислення матриці Якобі. Для кращої оцінки дрейфу гіроскопів без збільшення розмірів вектору стану сигнали гіроскопу були скориговані за кубічною поліноміальною температурною кривою. Однак слід зазначити, що процес лінеаризації моделі вимірювань системи неминуче призведе до помилок лінеаризації у фільтрі Калмана. Більш того алгоритм ОФК вимагає великої обчислювальної потужності мікроконтролерів для обчислення матриці Якобі.

У роботі [5] представлено ефективний адаптивний фільтр Калмана для безплатформної інерціальної системи орієнтації побудованої на основі мікро-електромеханічного інерційного вимірювального модуля та магнітометра. Розроблено лінійну модель похибок системи та отримано відповідну модель вимірювання. Крім того, в цьому методі коваріаційна матриця шуму вимірювання R може налаштовуватись адаптивно для досягнення оптимальної продуктивності в динамічному режимі руху. Експерименти показали, що запропонований спосіб дозволяє поліпшити орієнтацію продуктивності недорогих датчиків. В результаті напівнатурного моделювання з використанням вимірювань системи Xsens MTi запропонований алгоритм адаптивного фільтра Калмана може забезпечити точність у статиці не гірше 0.1° , в умовах слабкої динаміка – не гірше 0.5° , а в умовах високої динаміки руху – не гірше 1° , що в значній мірі випереджає результати самої комерційної системи або інші існуючі методи реалізації ОФК. Також слід зазначити, що великою перевагою запропонованого підходу у порівнянні з попередніми [3]-[4] є лінійність моделі похибок та вимірювань, що істотно спрощує процедури обрахунку алгоритму, відповідно знижуючи вимоги до обчислювальної потужності процесора.

У роботі [6] запропоновано алгоритм фільтр Калмана, який використовується в БКВ, побудованій на основі мікромеханічних інерційних датчиків. Описано склад і принцип роботи системи. Отримано модель вимірювання та рівняння похибок системи на основі кватерніонного рівняння орієнтації. В роботі використовується лінійна модель похибок, що в значній мірі спрощує обчислювальну складність алгоритму. Результати моделювання показують, що похибка системи не перевищує $0,04^\circ$ при відсутніх горизонтальних прискореннях. Первинні тести показують, що статична точність системи становить $\pm 0.2^\circ$ для тангажу і крену, та $\pm 0.3^\circ$ для азимута.

Доволі часто в літературі зустрічаються алгоритми із застосування комплементарних фільтрів. У роботі [7] запропоновано застосування нелінійного комплементарного фільтра для оцінки орієнтації безпілотного літального апарату з використанням сигналів мікроелектромеханічного інерційного вимірювального модуля. Запропоновано нелінійний додатковий фільтр, який поєднує в собі сигнали акселерометра для оцінки низьких частот з інтегрованими сигналами гіроскопів для

високочастотної оцінки. Вихідні сигнали акселерометра включають компоненти, що відповідають прискоренню безпілотного літального апарату, що відбувається, перш за все, при здійсненні повороту літака, а також прискорення сили Земного тяжіння, яке необхідне для здійснення оцінки у фільтрі. Прискорення планера оцінюється за допомогою простої доцентрової силової моделі (на основі додаткових вимірювань швидкості), доповнена динамічною моделлю першого порядку для кута атаки, і використовується для отримання оцінок гравітаційного напрямку, незалежного від маневрів літака. Для підтвердження ефективності застосування даного методу представлено результати експериментів на основі реальних даних.

У роботі [8] розглянуто можливість застосування додаткового фільтру у довільно розташованій системі координат. Проведено оцінку впливу структури передатної функції контролера у каналі корекції за сигналами акселерометрів на статичну точність комплементарного фільтра. Також використовуються сигнали магнітометрів для підвищення ефективності роботи додаткового фільтра. Отримані рівняння фільтра відносно похибок визначення кутів орієнтації дозволили здійснити синтез законів контролерів. Значення помилок, отриманих цими рівняннями, збігаються з точними оцінками. Показано, що при аналізі кутів орієнтації в системі координат з вертикальною віссю за рахунок правильного вибору передавальних функцій можна усунути статичні похибки щодо горизонтальних осей, обумовлені похибками магнітометра.

Новий підхід оцінки орієнтації об'єкта із застосуванням комплементарного фільтру розглянуто у роботі [9]. У даній роботі запропоновано алгоритм зі ступінчатою архітектурою фільтрації з постійним коефіцієнтом підсилення. Щоб уникнути використання ітераційних алгоритмів, модель вимірювання приведено до лінійної системи. Результати показують, що запропонована комплементарний фільтр може досягати точності фільтра Калмана, утримуючи баланс між точністю оцінки орієнтації та обчислювальними витратами. Крім того, показано, що магнітні збурення практично не впливають на розрахунок кутів орієнтації.

В сучасній літературі можна зустріти системи орієнтації які не використовують ДКШ. У роботі [10] розглянуто алгоритм, оцінка орієнтації в якому проводиться лише

за сигналами позиційних датчиків. Однак вагомим недоліком наведеного алгоритму є некоректність роботи в динаміці, так як система є надзвичайно чутливою до лінійних прискорень. Також, при наявності магнітних збурень, коректна оцінка кута курсу є неможливою, так як єдиним джерелом інформації про поточний курс об'єкта є сигнали магнітометрів.

1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок БКВ

У гіромагнітній курсовертикалі визначення поточної орієнтації об'єкту ґрунтується на інтегруванні кутової швидкості, що вимірюється блоком ДКШ з корекцією за сигналами акселерометрів та магнітометрів. Завдяки наявності магнітометрів, курсовертикаль може визначати поточний магнітний курс об'єкту.

Однак, за наявності магнітних збурень корекція ДКШ за сигналами магнітометрів стає хибною. На практиці використовують два методи усунення шкідливого впливу магнітних збурень у гіромагнітних приладах орієнтації [11]:

- раціональний вибір схеми магнітної корекції та її параметрів;
- тимчасове вимкнення магнітної корекції під час збурень.

У роботі [12] запропоновано алгоритм підвищення точності гіромагнітної курсовертикалі за наявності магнітних збурень за рахунок використання смугового фільтру. В роботі представлений алгоритм автоматичного вимкнення корекції ДКШ за сигналами магнітометрів при магнітних збуреннях та досліджено вибір параметрів цього алгоритму. Наведені результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого методу.

Проблему оцінки орієнтації об'єкта в умовах спотворення магнітного поля Землі (МПЗ) розглянуто у роботі [13]. Запропоновано підхід виявлення та зменшення впливу магнітних збурень на оцінку орієнтації за допомогою БКВ. Магнітні збурення виявляються шляхом використання варіювання кута магнітного нахилення, відносно вектора сили тяжіння, та модуля магнітної індукції. Наведені результати

експериментальних досліджень підтверджують ефективність даного методу як для статичних, так і для рухомих об'єктів.

У роботі [14] представлено алгоритмічний метод компенсації похибок внаслідок магнітних збурень на основі оптимального фільтра Калмана. У вектор стану запропонованої моделі входять похибки ДКШ (дрейфи), похибки оцінки орієнтації, і похибки магнітних збурень. Використовуючи вимірювання ДКШ, акселерометрів та магнітометрів проводиться оцінка похибок, що входять до вектору стану. Експериментальні дослідження проводились в квазістатичних та динамічних умовах з феромагнітними матеріалами, що знаходились поблизу модуля з датчиками. Представлені результати порівняння оцінки орієнтації з фільтром Калмана та оцінкою похибок магнітних збурень, з класичним фільтром Калмана (без оцінки магнітних збурень) та використовуючи лише ДКШ. Ефективні використання даного методу підтверджено шляхом порівняння експериментальних результатів з опорною оптичною системою Vicon 370E [15].

Один із методів забезпечення коректної оцінки орієнтації використовуючи БКВ в умовах магнітних збурень розглянуто в роботі [16]. Запропонований алгоритм побудовано на основі оптимального фільтра Калмана з використанням вимірювань ДКШ, акселерометрів та магнітометрів. Після інтегрування кватерніонного рівняння орієнтації, значення модулю магнітного поля порівнюється з максимально допустимим. У разі перевищення порогу сигнали магнітометрів не використовуються у моделі вимірювань ОФК, тобто оцінка похибок системи виконується за показами акселерометрів. У протилежному випадку, якщо модуль магнітного поля не перевищує поріг, тобто магнітне збурення не зареєстровано, сигнали магнітометрів входять до моделі вимірювання. Суттєвим недоліком даного методу є те, що він ефективний лише в умовах статики, так як за наявності прискорень оцінка похибок орієнтації за сигналами акселерометрів неможлива.

У роботі [17] представлено послідовний алгоритм оцінки орієнтації БКВ з використанням МНК та двох лінійних ОФК, для оцінки кутів крену і тангажу, та для оцінки курсу. В останньому напрямку локального вектора магнітного поля проектується на вертикальну вісь БКВ з урахування кута нахилання, який оцінюється

на першому етапі оцінки ОФК. Запропонований алгоритм оцінювався при різних умовах магнітних збурень для дослідження характеристик оцінки залежно від кінематичних і магнітних умов. Усереднене середньоквадратичне значення похибок оцінки курсу при двох динамічних випробуваннях становить 1.7° , тоді як для двох статичних випробувань 0.8° .

Також існує проблема перехресних зв'язків між каналами корекції безплатформної курсовертикалі. В багатьох існуючих алгоритми корекції БКВ не враховують наявності впливу другого каналу корекції (по магнітометрах) на результати з першого етапу (по акселерометрах).

Для корекції в азимутальному напрямку використовуються магнітометри, що вимірюють проекції вектора індукції МПЗ. Надлишкова інформація вектора вимірювання, що представлена вертикальною складовою МПЗ, призводить до появи перевизначеності в каналі корекції по вертикальному (акселерометричному каналу). Суттєвим недоліком такого підходу є використання двох складових МПЗ H та Z . Схильність МПЗ до девіації від впливу дії магнітотвердого та магнітом'якого заліза, вносить додаткову не скомпенсовану похибку у вертикальний канал. На практиці це спостерігається, як перехресний зв'язок між акселерометричним та магнітометричним каналами. Тобто збурення МПЗ впливають на точність визначення орієнтації об'єкта відносно горизонту. Похибка може досягати декількох градусів [18].

Проблему перехресних зв'язків між азимутальним та горизонтальним каналами корекції БКВ розглянуто у роботах [19]-[20]. Приведено корекційні рівняння системи за результатами вимірів акселерометрів та магнітометрів. Проаналізовано особливості формування похибок курсовертикалей від гіроскопів та позиційних датчиків, показана наявність перехресних зв'язків між каналами. На основі теоретичних викладок запропоновано два методи розділення каналів. У першому алгоритмі використовується матриця напрямних косинусів. Другий алгоритм у якості параметрів орієнтації використовує кватерніон. Для розділення каналів використовується оцінка орієнтації, що отримується на першому етапі корекції. У першому алгоритмі розділення реалізується шляхом вилучення вертикальної

складової МПЗ та вибору корекції для відповідних стовпців матриці напрямних косинусів. У другому алгоритму – алгоритмічним шляхом модифікується опорний вектор МПЗ, шляхом обнуління вертикальної складової магнітного поля у вимірюваннях магнітометрів.

Через те що рівень точності існуючих мікромеханічних гіроскопів не дає змоги вимірювати кутову швидкість обертання Землі, практично немає можливості побудувати гіроскопічну систему орієнтації, яка була б інваріантною до горизонтальних прискорень об'єкта (так зване настроювання на період Шулера [21]). Тому за наявності лінійних прискорень у місці встановлення курсовертикалі, наприклад при хитавиці об'єкта, вона матиме похибку у визначенні кутів орієнтації.

На сьогоднішній день відомі наступні чотири підходи вирішення проблеми оцінки орієнтації БКВ при наявності лінійних прискорень об'єкта [22]:

- Використання GPS для визначення лінійної швидкості об'єкта [23];
- Корекція сигналів акселерометрів за сигналами GPS [24];
- Використання барометричних датчиків для визначення лінійної швидкості об'єкта [25];
- Оцінка прискорень з використанням ОФК [26].

У роботі [26] розглянуто можливість оцінки прискорень об'єкта в динамічних умовах з використанням ОФК. Наведені результати демонструють відмінну точність оцінки орієнтації у низько-динамічних умовах та задовільну точність у високодинамічних умовах.

Вплив хитавиці на поведінку курсовертикалей і більш простих систем — гіровертикалей, курсових приладів, достатньо повно досліджено в літературі [11], [21]. Запропоновано ряд методів зменшення впливу хитавиці на точність таких систем, однак повна компенсація їх похибок неможлива без залучення додаткової зовнішньої інформації про рух об'єкта [27].

У роботі [28] розглядається метод оцінки та компенсації похибок БКВ при хитавиці об'єкта при відомому положенні БКВ відносно центра хитавиці. Наведено формули, що дають можливість оцінити залишкові похибки БКВ при використанні

запропонованого алгоритму в залежності від характеристик датчиків БКВ, параметрів її корекції, параметрів хитавиці, точності визначення положення БКВ відносно центру хитавиці. Представлено результати експериментальних досліджень, що підтверджують істотне зменшення похибок БКВ при хитавиці (приблизно у 4 рази) при використанні запропонованого алгоритму. Результати експерименту досить точно відповідають оцінкам похибок.

1.3 Мета і завдання дослідження

Мета: підвищення точності та компенсація похибок мікромеханічної безплатформної курсовертикалі шляхом удосконалення та оптимізації існуючих алгоритмів роботи БКВ.

Завдання:

1. Інформаційно-аналітичний огляд стану.
2. Аналіз сучасних методів алгоритмічної компенсації похибок та підвищення точності безплатформних систем орієнтації.
3. Вдосконалення алгоритму роботи БКВ.
4. Розробка алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань БКВ.
5. Експериментальна перевірка результатів дослідження.

Об'єкт: алгоритм роботи безплатформної інерціальної курсовертикалі.

Предмет: вдосконалення алгоритму роботи БКВ та оцінка параметрів морської хвилі.

РОЗДІЛ 2

БАЗОВИЙ АЛГОРИТМ РОБОТИ БКВ

В даному розділі розглянуто принцип побудови базового алгоритму роботи мікромеханічної безплатформної курсовертикалі на основні оптимального фільтру Калмана. БКВ – це безплатформна вимірювальна система, що складається з трьох мікромеханічних ДКШ, акселерометрів та магнітометрів.

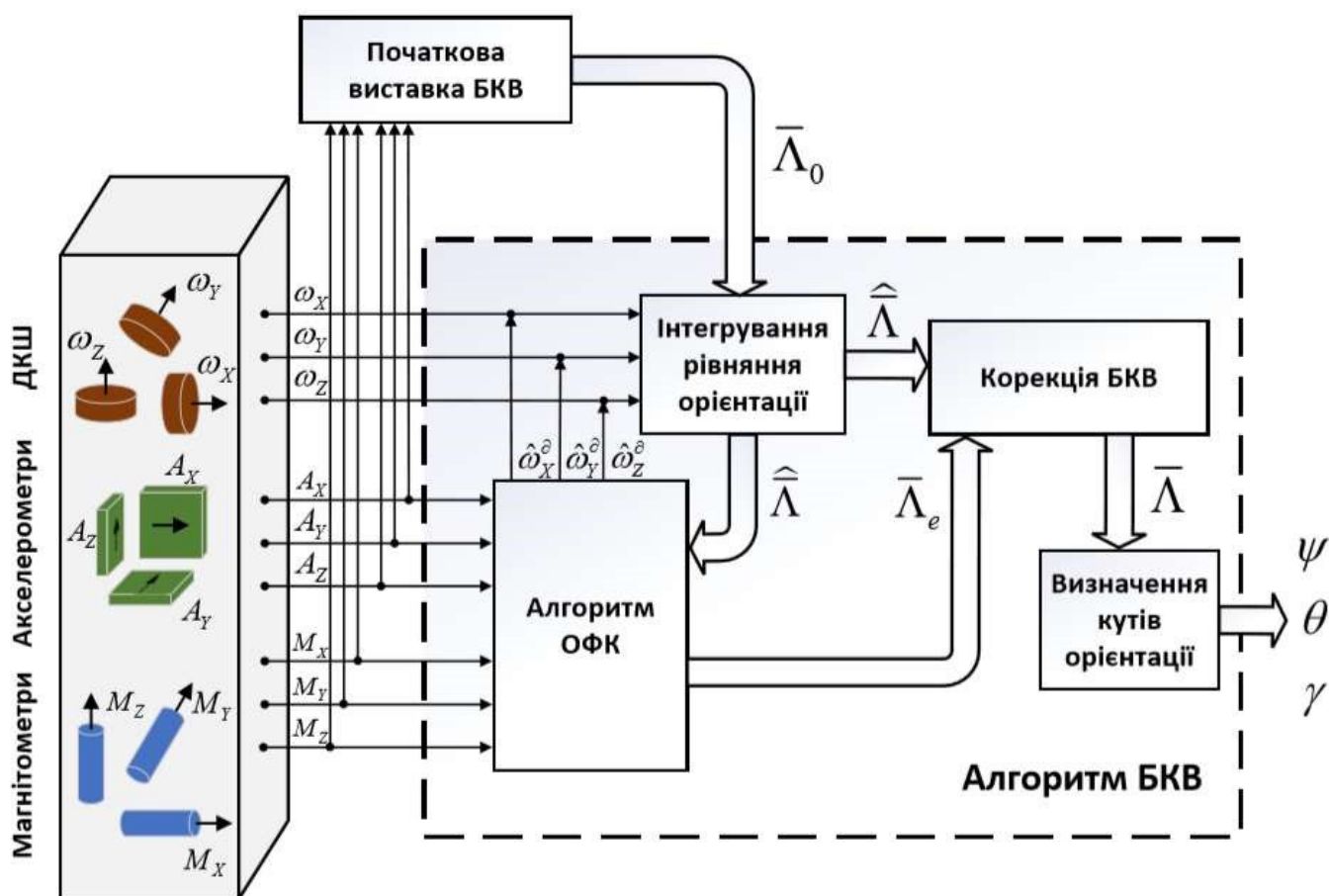


Рис. 2.1. Функціональна схема БКВ

На рис. 2.1 зображена функціональна схема курсовертикалі, алгоритм якої базується на інтегруванні рівняння орієнтації. Початкові умови інтегрування визначаються на етапі початкової виставки БКВ. Через наявність помилок в сигналах

ДКШ (дрейфи, шуми та ін.) необхідно здійснювати корекцію системи, в якості якої використовується алгоритм ОФК.

2.1 Рівняння орієнтації з параметрами Родриго-Гамільтона

Рівняннями орієнтації називають диференціальні рівняння, в результаті розв'язку яких отримують параметри, що характеризують положення об'єкту відносно обраної системи координат. Рівняння дозволяють по вимірюваним проекціям абсолютної кутової швидкості об'єкта і обрахованим проекціям кутової швидкості супроводжуючого тригранника визначити кути курсу, крену і тангажу об'єкта.

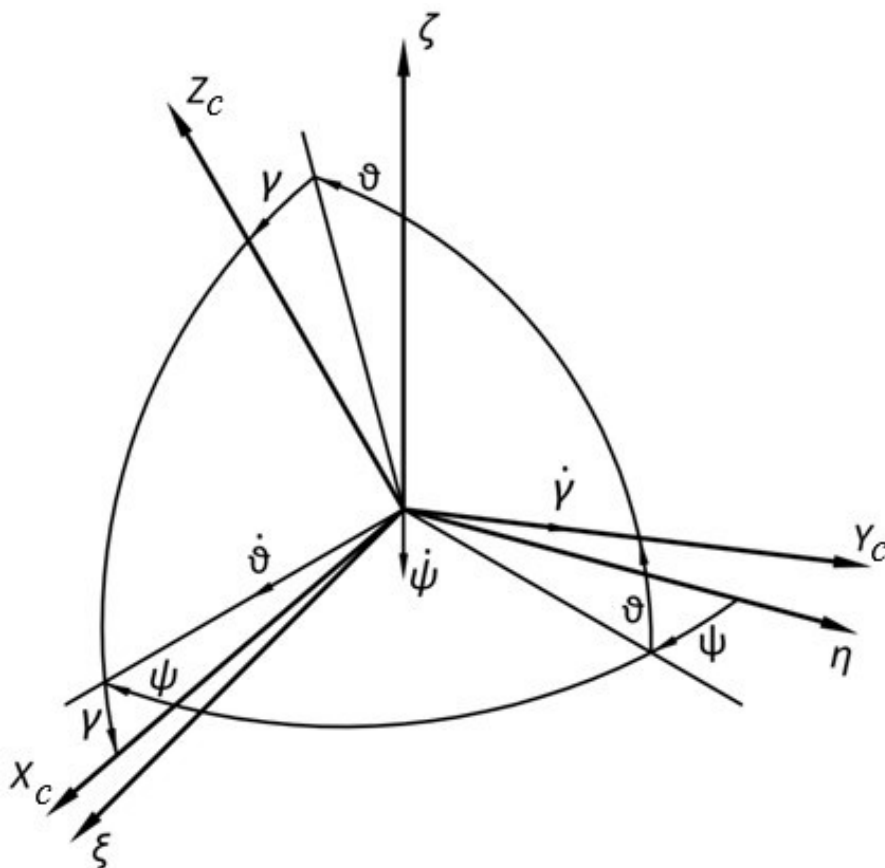


Рис. 2.2. Взаємне положення географічного і зв'язаного з об'єктом тригранників

На рис. 2.2. $O\xi\eta\zeta$ - географічний супроводжуючий тригранник, вісь $O\eta$ - направлена на північ, $Ox_cy_cz_c$ - зв'язаний з об'єктом тригранник, ψ - кут курсу, ϑ - кут тангажу, γ - кут крену.

Розглянемо базовий алгоритм роботи безплатформної курсовертикалі на базі тривісного блоку датчиків кутової швидкості (ДКШ), акселерометрів та магнітометрів. Для визначення кутів орієнтації інтегрується кватерніонне рівняння орієнтації (2.1). За даними акселерометрів та магнітометрів проводиться початкова виставка курсовертикалі, та подальша корекція ДКШ.

Запишемо кватерніонне диференціальне рівняння орієнтації [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_0 \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \\ \dot{\lambda}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 \\ \lambda_0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & \lambda_0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

В результаті інтегрування рівняння отримаємо значення елементів кватерніону Λ , використовуючи які можна визначити матрицю напрямних косинусів:

C^{gb}	x_c	y_c	z_c
ξ	$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2$	$2(-\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)$	$2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2)$
η	$2(\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)$	$\lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2$	$2(-\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3)$
ζ	$2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2)$	$2(\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3)$	$\lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2$

(2.2)

Використовуючи отримані напрямні косинуси (2.2) знайдемо шукані кути орієнтації:

$$\begin{aligned} \psi &= \arctg\left(\frac{C_{1,2}^{gb}}{C_{2,2}^{gb}}\right), \\ \gamma &= -\arctg\left(\frac{C_{3,1}^{gb}}{C_{3,3}^{gb}}\right), \\ \theta &= \arcsin(C_{3,2}^{gb}) = \arctg\left(\frac{C_{3,2}^{gb}}{\sqrt{1 - C_{3,2}^{gb^2}}}\right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2 Похибки обчислення кутів орієнтації об'єкта БКВ

Нехай кути β , α та δ задають положення «приладної» географічної системи координат $O\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$, обчисленої в БКВ, відносно дійсної географічної системи координат $Oxyz$, як показано на рис. 2.3. Кути β та α – похибка аналітичної побудови вертикалі в БКВ, а кут δ – похибка визначення напрямку меридіана.

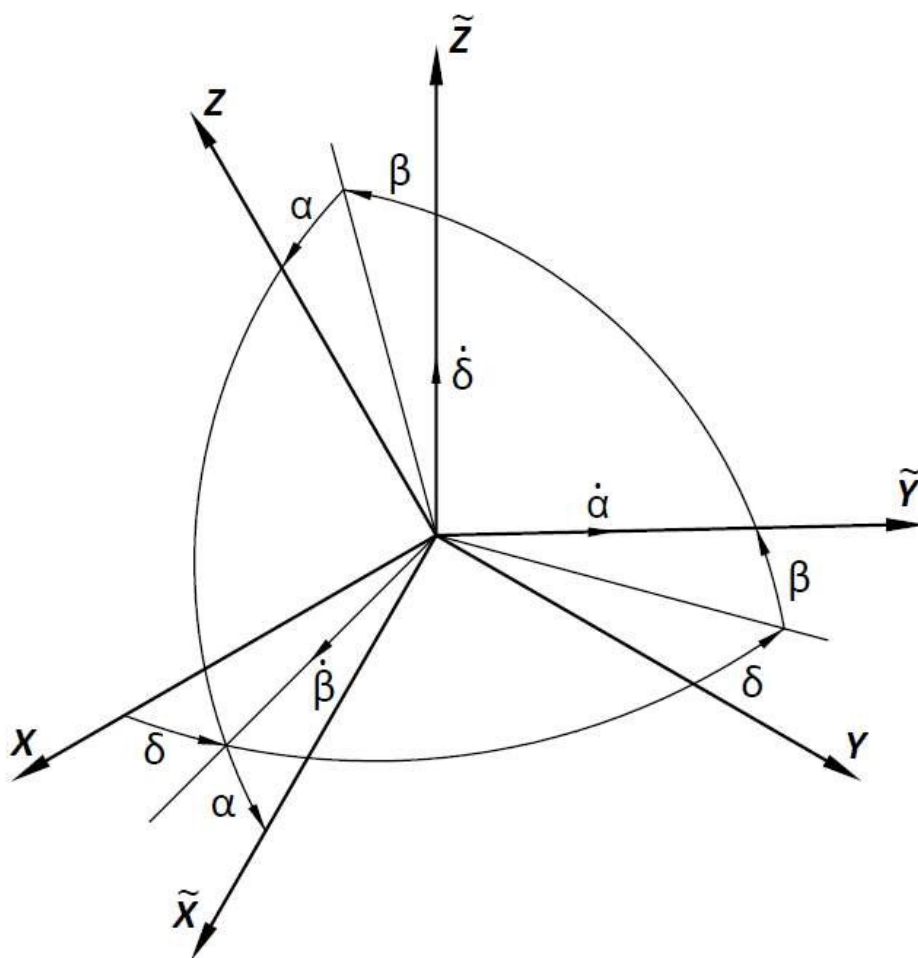


Рис. 2.3. Взаємне положення дійсного і обчисленого географічних тригранників

З урахуванням малості кутів β , α та δ :

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & -\alpha \\ -\delta & 1 & \beta \\ \alpha & -\beta & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \delta & -\alpha \\ -\delta & 1 & \beta \\ \alpha & -\beta & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Перейдемо від кутів до кватерніону похибки, для цього запишемо кватерніони, що відповідають кожному з поворотів δ , β та α [1]:

повороту на кут δ відповідає кватерніон $M = \cos \frac{\delta}{2} + \vec{k} \sin \frac{\delta}{2}$,

повороту на кут β відповідає кватерніон $N = \cos \frac{\beta}{2} + \vec{i} \sin \frac{\beta}{2}$,

повороту на кут α відповідає кватерніон $P = \cos \frac{\alpha}{2} - \vec{j} \sin \frac{\alpha}{2}$.

Виконавши кватерніонне множення у зворотному порядку $\bar{\Lambda}_e = \bar{P} \otimes \bar{N} \otimes \bar{M}$, отримаємо параметри кватерніону похибки $\bar{\Lambda}_e = \lambda_{e0} + \vec{i}\lambda_{e1} + \vec{j}\lambda_{e2} + \vec{k}\lambda_{e3}$, де:

$$\bar{P} = [\cos \frac{\alpha}{2} \quad 0 \quad \sin \frac{\alpha}{2} \quad 0],$$

$$\bar{N} = [\cos \frac{\beta}{2} \quad \sin \frac{\beta}{2} \quad 0 \quad 0], \quad (2.6)$$

$$\bar{M} = [\cos \frac{\delta}{2} \quad 0 \quad 0 \quad \cos \frac{\delta}{2}].$$

$$\bar{P} \otimes \bar{N} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \\ \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \\ -\sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \end{bmatrix}^T.$$

$$\bar{\Lambda}_e = (\bar{P} \otimes \bar{N}) \otimes \bar{M} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \cos \frac{\delta}{2} - \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \cos \frac{\delta}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \cos \frac{\delta}{2} - \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ -\sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \cos \frac{\delta}{2} + \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}^T. \quad (2.7)$$

З урахуванням малості кутів β , α та δ запишемо значення елементів кватерніону похибки:

$$\lambda_{e0} = 1, \quad \lambda_{e1} = \frac{\beta}{2}, \quad \lambda_{e2} = \frac{\alpha}{2}, \quad \lambda_{e3} = \frac{\delta}{2}.$$

$$\bar{\Lambda}_e = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\beta}{2} & \frac{\alpha}{2} & \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Сформуємо кососиметричну матрицю з елементів кватерніону похибки:

$$[\Lambda_e \times] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\delta}{2} & -\frac{\alpha}{2} \\ -\frac{\delta}{2} & 0 & \frac{\beta}{2} \\ \frac{\alpha}{2} & -\frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Використовуючи елементи кватерніону похибки, запишемо матрицю напрямних косинусів переходу від дійсного географічного тригранника до «приладного»:

ΔC^*	x	y	z
\tilde{x}	$\lambda_{e0}^2 + \lambda_{e1}^2 - \lambda_{e2}^2 - \lambda_{e3}^2$	$2(\lambda_{e0}\lambda_{e3} + \lambda_{e1}\lambda_{e2})$	$2(\lambda_{e1}\lambda_{e3} - \lambda_{e0}\lambda_{e2})$
\tilde{y}	$2(-\lambda_{e0}\lambda_{e3} + \lambda_{e1}\lambda_{e2})$	$\lambda_{e0}^2 - \lambda_{e1}^2 + \lambda_{e2}^2 - \lambda_{e3}^2$	$2(\lambda_{e0}\lambda_{e1} + \lambda_{e2}\lambda_{e3})$
\tilde{z}	$2(\lambda_{e1}\lambda_{e3} + \lambda_{e0}\lambda_{e2})$	$2(-\lambda_{e0}\lambda_{e1} + \lambda_{e2}\lambda_{e3})$	$\lambda_{e0}^2 - \lambda_{e1}^2 - \lambda_{e2}^2 + \lambda_{e3}^2$

(2.10)

Враховуючи, що $\lambda_{e0} = 1$, а $\lambda_{e1}, \lambda_{e2}, \lambda_{e3} \ll 1$ перепишемо матрицю ΔC^* :

$$\Delta C^* = \begin{bmatrix} 1 & 2\lambda_{e3} & -2\lambda_{e2} \\ -2\lambda_{e3} & 1 & 2\lambda_{e1} \\ 2\lambda_{e2} & -2\lambda_{e1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & -\alpha \\ -\delta & 1 & \beta \\ \alpha & -\beta & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

В результаті, отримана матриця ΔC^* збігається з матрицею B (2.5) у відповідності до кінематики (рис. 2.3). Запишемо еквівалентну матрицю ΔC , використовуючи кососиметричну матрицю елементів кватерніону похибки:

$$\Delta C^* = I^{3 \times 3} + 2[\Lambda_e \times], \quad (2.12)$$

$$\Delta C^* = B. \quad (2.13)$$

2.3 Рівняння похибок та модель стану БКВ

Дійсний кватерніон орієнтації $\bar{\Lambda}$ можна отримати в результаті кватерніонного множення [6]:

$$\bar{\Lambda} = \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \bar{\Lambda}_e, \quad (2.14)$$

де $\tilde{\tilde{\Lambda}}$ - оцінка кватерніону орієнтації (“~” - оцінка), а $\bar{\Lambda}_e$ - кватерніон похибки.

Продиференціюємо рівняння (2.14):

$$\dot{\bar{\Lambda}} = \dot{\tilde{\tilde{\Lambda}}} \otimes \bar{\Lambda}_e + \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \dot{\bar{\Lambda}}_e. \quad (2.15)$$

$$\dot{\bar{\Lambda}} = \frac{1}{2} \bar{\Lambda} \otimes \bar{\omega}, \quad \dot{\bar{\Lambda}}_e = \frac{1}{2} \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \tilde{\tilde{\omega}}, \quad (2.16)$$

$$\text{де } \bar{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix} \quad \tilde{\tilde{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\tilde{\omega}}_x & \tilde{\tilde{\omega}}_y & \tilde{\tilde{\omega}}_z \end{bmatrix}.$$

Перепишемо рівняння (2.15) з урахуванням (2.16):

$$\frac{1}{2} \bar{\Lambda} \otimes \bar{\omega} = \frac{1}{2} \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \tilde{\tilde{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e + \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \dot{\bar{\Lambda}}_e. \quad (2.17)$$

Для того щоб виразити $\dot{\bar{\Lambda}}_e$ з рівняння (2.17), помножимо зліва усі його складові на $(\tilde{\tilde{\Lambda}})^{-1}$:

$$\frac{1}{2} (\tilde{\tilde{\Lambda}})^{-1} \otimes \bar{\Lambda} \otimes \bar{\omega} = \frac{1}{2} (\tilde{\tilde{\Lambda}})^{-1} \otimes \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \tilde{\tilde{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e + (\tilde{\tilde{\Lambda}})^{-1} \otimes \tilde{\tilde{\Lambda}} \otimes \dot{\bar{\Lambda}}_e \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{\bar{\Lambda}}_e = \frac{1}{2} \left(\tilde{\bar{\Lambda}} \right)^{-1} \otimes \bar{\Lambda} \otimes \bar{\omega} - \frac{1}{2} \tilde{\bar{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e. \quad (2.18)$$

У відповідності до рівняння (2.14) $\tilde{\bar{\Lambda}} = \bar{\Lambda} \otimes (\bar{\Lambda}_e)^{-1}$, тоді:

$$\left(\tilde{\bar{\Lambda}} \right)^{-1} = \left(\bar{\Lambda} \otimes (\bar{\Lambda}_e)^{-1} \right)^{-1} = \bar{\Lambda}_e \otimes (\bar{\Lambda})^{-1}. \quad (2.19)$$

Перепишемо рівняння (2.18) з урахуванням (2.19):

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\Lambda}}_e &= \frac{1}{2} \bar{\Lambda}_e \otimes (\bar{\Lambda})^{-1} \otimes \bar{\Lambda} \otimes \bar{\omega} - \frac{1}{2} \tilde{\bar{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e, \\ \dot{\bar{\Lambda}}_e &= \frac{1}{2} \bar{\Lambda}_e \otimes \bar{\omega} - \frac{1}{2} \tilde{\bar{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e = -\frac{1}{2} (\tilde{\bar{\omega}} \otimes \bar{\Lambda}_e - \bar{\Lambda}_e \otimes \bar{\omega}). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Запишемо рівняння (2.20) у векторно-матричній формі:

$$\dot{\bar{\Lambda}}_e = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda_{e0} & -\lambda_{e1} & -\lambda_{e2} & -\lambda_{e3} \\ \lambda_{e1} & \lambda_{e0} & -\lambda_{e3} & \lambda_{e2} \\ \lambda_{e2} & \lambda_{e3} & \lambda_{e0} & -\lambda_{e1} \\ \lambda_{e3} & -\lambda_{e2} & \lambda_{e1} & \lambda_{e0} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{\omega}_x \\ \tilde{\omega}_y \\ \tilde{\omega}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ \omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{e0} \\ \lambda_{e1} \\ \lambda_{e2} \\ \lambda_{e3} \end{bmatrix},$$

та враховуючи, що $\bar{\Lambda}_e \approx \begin{bmatrix} 1 & \bar{\lambda}_e \end{bmatrix}$, де $\bar{\lambda}_e = \begin{bmatrix} \lambda_{e1} & \lambda_{e2} & \lambda_{e3} \end{bmatrix}$:

$$\dot{\bar{\Lambda}}_e = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \lambda_{e1}\omega_x - \lambda_{e1}\tilde{\omega}_x + \lambda_{e2}\omega_y - \lambda_{e2}\tilde{\omega}_y + \lambda_{e3}\omega_z - \lambda_{e3}\tilde{\omega}_z \\ \tilde{\omega}_x - \omega_x - \lambda_{e3}\omega_y - \lambda_{e3}\tilde{\omega}_y + \lambda_{e2}\omega_z + \lambda_{e2}\tilde{\omega}_z \\ \tilde{\omega}_y - \omega_y + \lambda_{e3}\omega_x + \lambda_{e3}\tilde{\omega}_x - \lambda_{e1}\omega_z - \lambda_{e1}\tilde{\omega}_z \\ \tilde{\omega}_z - \omega_z - \lambda_{e2}\omega_x - \lambda_{e2}\tilde{\omega}_x + \lambda_{e1}\omega_y + \lambda_{e1}\tilde{\omega}_y \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Приймаючи, що $\tilde{\omega}_i - \omega_i = \Delta\omega_i$ та $\omega_i = \tilde{\omega}_i - \Delta\omega_i$ перепишемо рівняння (2.21)

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\Lambda}}_e &= -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\lambda_{e1}\Delta\omega_x - \lambda_{e2}\Delta\omega_y - \lambda_{e3}\Delta\omega_z \\ \Delta\omega_x + \lambda_{e2}\tilde{\omega}_z - \lambda_{e3}\tilde{\omega}_y - \lambda_{e3}(\tilde{\omega}_y - \Delta\omega_y) + \lambda_{e2}(\tilde{\omega}_z - \Delta\omega_z) \\ \Delta\omega_y - \lambda_{e1}\tilde{\omega}_z + \lambda_{e3}\tilde{\omega}_x - \lambda_{e1}(\tilde{\omega}_z - \Delta\omega_z) + \lambda_{e3}(\tilde{\omega}_x - \Delta\omega_x) \\ \Delta\omega_z + \lambda_{e1}\tilde{\omega}_y - \lambda_{e2}\tilde{\omega}_x + \lambda_{e1}(\tilde{\omega}_y - \Delta\omega_y) - \lambda_{e2}(\tilde{\omega}_x - \Delta\omega_x) \end{bmatrix} = \\ &= -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\lambda_{e1}\Delta\omega_x - \lambda_{e2}\Delta\omega_y - \lambda_{e3}\Delta\omega_z \\ \Delta\omega_x + 2\lambda_{e2}\tilde{\omega}_z - 2\lambda_{e3}\tilde{\omega}_y + \lambda_{e3}\Delta\omega_y - \lambda_{e2}\Delta\omega_z \\ \Delta\omega_y - 2\lambda_{e1}\tilde{\omega}_z + 2\lambda_{e3}\tilde{\omega}_x + \lambda_{e1}\Delta\omega_z - \lambda_{e3}\Delta\omega_x \\ \Delta\omega_z + 2\lambda_{e1}\tilde{\omega}_y - 2\lambda_{e2}\tilde{\omega}_x - \lambda_{e1}\Delta\omega_y + \lambda_{e2}\Delta\omega_x \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Враховуючи, що λ_i та $\Delta\omega_i \ll 1$, то їх добутками можна нехтувати, приймаючи їх за величини другого порядку малості. Тому, враховуючи, що $\lambda_{e0} = 1$, а $\dot{\lambda}_{e0} = 0$, в подальшому перший рядок рівняння (2.22) не розглядатиметься.

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{e1} \\ \dot{\lambda}_{e2} \\ \dot{\lambda}_{e3} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta\omega_x + 2\lambda_{e2}\tilde{\omega}_z - 2\lambda_{e3}\tilde{\omega}_y \\ \Delta\omega_y - 2\lambda_{e1}\tilde{\omega}_z + 2\lambda_{e3}\tilde{\omega}_x \\ \Delta\omega_z + 2\lambda_{e1}\tilde{\omega}_y - 2\lambda_{e2}\tilde{\omega}_x \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta\omega_x \\ \Delta\omega_y \\ \Delta\omega_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\omega}_z & -\tilde{\omega}_y \\ -\tilde{\omega}_z & 0 & \tilde{\omega}_x \\ \tilde{\omega}_y & -\tilde{\omega}_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{e1} \\ \lambda_{e2} \\ \lambda_{e3} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{\lambda}_e = -[\tilde{\omega} \times] \lambda_e - \frac{1}{2} \Delta\bar{\omega}, \quad (2.23)$$

$$\text{де } \lambda_e = \begin{bmatrix} \lambda_{e1} \\ \lambda_{e2} \\ \lambda_{e3} \end{bmatrix}, \Delta\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_x - \omega_x \\ \tilde{\omega}_y - \omega_y \\ \tilde{\omega}_z - \omega_z \end{bmatrix}, \text{ а } [\tilde{\omega} \times] = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\omega}_z & -\tilde{\omega}_y \\ -\tilde{\omega}_z & 0 & \tilde{\omega}_x \\ \tilde{\omega}_y & -\tilde{\omega}_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Похибка оцінки кутової швидкості $\Delta\bar{\omega}$ включає білий шум $W_1(t)$ та зміщення нулів ДКШ ΔB , що можуть бути представлені, як випадкове блукання нуля $\Delta\dot{B} = W_2(t)$. В результаті сформуємо вектор стану:

$$X = \begin{bmatrix} \lambda_e \\ \Delta B \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Відповідно до (2.23 – 2.24) запишемо рівняння стану:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t), \quad (2.25)$$

$$\text{де матриця стану: } F(t) = \begin{bmatrix} -[\tilde{\omega} \times] & -\frac{1}{2}I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

$$\text{а вектор шумів: } W(t) = \begin{bmatrix} W_1(t) \\ W_2(t) \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

2.4 Модель вимірювань БКВ

В якості позиційних датчиків, у складі БКВ використовуються тривісні блоки акселерометрів та магнітометрів. Акселерометри вимірюють проекції уявного лінійного прискорення об'єкта на осі зв'язаної з об'єктом системи координат:

$\vec{a} = \vec{w} - \vec{g}$, де \vec{w} – вектор лінійного прискорення об'єкта, \vec{g} – вектор прискорення земної сили тяжіння. Якщо об'єкт нерухомий відносно Землі, то $\vec{a} = -\vec{g}$ і акселерометри можна використати для визначення кутів нахилу об'єкта.

Вихідні сигнали акселерометрів запишемо у вигляді проекції вектору прискорення земної сили тяжіння на осі об'єкта з урахуванням похибок та наявних шумів у сигналах акселерометрів $V_a(t)$:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = C^{bg} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + V_a(t), \quad (2.28)$$

де $C^{bg} = B^{-1}\tilde{C}^{bg}$ виходячи з виразу (2.5). Враховуючи, що $B^{-1} = B^T$, та у відповідності до рівнянь (2.12 – 2.13), запишемо:

$$B^{-1} = \Delta C^T = I^{3 \times 3} - 2[\Lambda_e \times],$$

$$C^{bg} = (I^{3 \times 3} - 2[\Lambda_e \times])\tilde{C}^{bg},$$

та підставимо отриманий вираз у рівняння (2.28):

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = (I^{3 \times 3} - 2[\Lambda_e \times])\tilde{C}^{bg} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + V_a(t). \quad (2.29)$$

Похибку вимірювання запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{a} &= \tilde{\vec{a}} - \vec{a}, \quad \tilde{\vec{a}} = \tilde{C}^{bg} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \\ \Delta \vec{a} &= \tilde{C}^{bg} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - (I^{3 \times 3} - 2[\Lambda_e \times])\tilde{C}^{bg} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + V_a(t) = \\ &= \tilde{\vec{a}} - (I^{3 \times 3} - 2[\Lambda_e \times])\tilde{\vec{a}} + V_a(t) = 2[\Lambda_e \times]\tilde{\vec{a}} + V_a(t); \\ \Delta \vec{a} &= 2[\tilde{\vec{a}} \times]\vec{\lambda}_e + V_a(t); \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$[\tilde{a} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{a}_z & \tilde{a}_y \\ \tilde{a}_z & 0 & -\tilde{a}_x \\ -\tilde{a}_y & \tilde{a}_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Аналогічно з акселерометрами запишемо похибки вимірювання магнітометрів:

$$\Delta \bar{m} = 2[\tilde{m} \times] \bar{\lambda}_e + V_m(t); \quad (2.31)$$

$$[\tilde{m} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{m}_z & \tilde{m}_y \\ \tilde{m}_z & 0 & -\tilde{m}_x \\ -\tilde{m}_y & \tilde{m}_x & 0 \end{bmatrix}.$$

В результаті, вектор вимірювань можна сформулювати в наступному вигляді:

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta \bar{a} \\ \Delta \bar{m} \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Використовуючи вектор стану (2.24) та отриманий вектор вимірювань, запишемо рівняння вимірювань:

$$Y = D \cdot X + V, \quad (2.33)$$

де матриця вимірювань:

$$D = \begin{bmatrix} 2[\tilde{a} \times] & 0^{3 \times 3} \\ 2[\tilde{m} \times] & 0^{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

а вектор шумів:

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_m \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

2.5 Спрощення моделі вимірювань БКВ

Розглянемо можливість спрощення вектору вимірювання (2.32), що складається з 6 компонентів, до трикомпонентного вектору. Для цього розглянемо кути похибок визначення орієнтації β , α та δ .

2.5.1 Похибки визначення вертикалі β і α

Проекції прискорення сили тяжіння на осі географічної системи координат:

$$\begin{bmatrix} a_x^g \\ a_y^g \\ a_z^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} a_x^g \\ a_y^g \\ a_z^g \end{bmatrix} = C^{gb} \cdot \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ a_z^b \end{bmatrix}, \quad (2.37)$$

де a_i^b – ідеальні сигнали акселерометрів. Розглянемо «приладні» значення проекцій прискорення сили тяжіння на осі «приладної» географічної системи координат:

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x^g \\ \tilde{a}_y^g \\ \tilde{a}_z^g \end{bmatrix} = \tilde{C}^{gb} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{a}_x^b \\ \tilde{a}_y^b \\ \tilde{a}_z^b \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

де $\tilde{C}^{gb} = \Delta C \cdot C^{gb}$, тоді:

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x^b \\ \tilde{a}_y^b \\ \tilde{a}_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ a_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^b \\ \Delta a_y^b \\ \Delta a_z^b \end{bmatrix}.$$

Перепишемо рівняння (2.38) з урахуванням (2.37):

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x^g \\ \tilde{a}_y^g \\ \tilde{a}_z^g \end{bmatrix} = \Delta C \cdot C^{gb} \cdot \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ a_z^b \end{bmatrix} + \Delta C \cdot C^{gb} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_x^b \\ \Delta a_y^b \\ \Delta a_z^b \end{bmatrix} = \Delta C \cdot \begin{bmatrix} a_x^g \\ a_y^g \\ a_z^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^g \\ \Delta a_y^g \\ \Delta a_z^g \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

$$\text{де } \Delta C = \begin{bmatrix} 1 & -\delta & \alpha \\ \delta & 1 & -\beta \\ -\alpha & \beta & 1 \end{bmatrix}.$$

Використовуючи рівняння (5.4) запишемо значення проекцій прискорення сили тяжіння на осі «приладної» географічної системи координат, та відповідні кути похибки визначення вертикалі:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tilde{a}_x^g \\ \tilde{a}_y^g \\ \tilde{a}_z^g \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha \cdot g \\ -\beta \cdot g \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^g \\ \Delta a_y^g \\ \Delta a_z^g \end{bmatrix}, \\
\alpha &= \frac{\tilde{a}_x^g}{g} - \frac{\Delta a_x^g}{g}, \\
\beta &= -\frac{\tilde{a}_y^g}{g} + \frac{\Delta a_y^g}{g}.
\end{aligned} \tag{2.40}$$

2.5.2 Похибка визначення орієнтації в азимуті δ

Аналогічно п.2.5.1 запишемо «приладні» значення проекцій вектору магнітної індукції МПЗ на осі «приладної» географічної системи координат:

$$\begin{bmatrix} \tilde{m}_x^g \\ \tilde{m}_y^g \\ \tilde{m}_z^g \end{bmatrix} = \Delta C \cdot C^{gb} \cdot \begin{bmatrix} m_x^b \\ m_y^b \\ m_z^b \end{bmatrix} + \Delta C \cdot C^{gb} \cdot \begin{bmatrix} \Delta m_x^b \\ \Delta m_y^b \\ \Delta m_z^b \end{bmatrix} = \Delta C \cdot \begin{bmatrix} m_x^g \\ m_y^g \\ m_z^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta m_x^g \\ \Delta m_y^g \\ \Delta m_z^g \end{bmatrix}, \tag{2.41}$$

де $\begin{bmatrix} m_x^g \\ m_y^g \\ m_z^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ H \\ -Z \end{bmatrix}$, H і Z – горизонтальна та вертикальна складові вектору магнітної індукції МПЗ.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tilde{m}_x^g \\ \tilde{m}_y^g \\ \tilde{m}_z^g \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\delta H - \alpha \cdot Z \\ H + \beta \cdot Z \\ \beta H - Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta m_x^g \\ \Delta m_y^g \\ \Delta m_z^g \end{bmatrix}, \\
\delta &= -\frac{\tilde{m}_x^g}{H} + \alpha \frac{Z}{H} + \frac{\Delta m_x^g}{H}.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

де $Z/H = \operatorname{tg} I$, де I – кут магнітного нахилення (магнітна широта).

2.5.3 Спрощена модель вимірювань БКВ

Похибки визначення орієнтації α, β та δ мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{\tilde{a}_x^g}{g} - \frac{\Delta a_x^g}{g}, \\
\beta &= -\frac{\tilde{a}_y^g}{g} + \frac{\Delta a_y^g}{g}, \\
\delta &= -\frac{\tilde{m}_x^g}{H} - \alpha \frac{Z}{H} + \frac{\Delta m_x^g}{H}.
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Відповідно до виразу (2.8) здійснимо перехід від кутів похибок (2.43) до елементів кватерніону похибки:

$$\begin{aligned}
\lambda_{e2} &= \frac{\tilde{a}_x^g}{2g} - \frac{\Delta a_x^g}{2g}, \\
\lambda_{e1} &= -\frac{\tilde{a}_y^g}{2g} + \frac{\Delta a_y^g}{2g}, \\
\lambda_{e3} &= -\frac{\tilde{m}_x^g}{2H} - \lambda_{e2} \frac{Z}{H} + \frac{\Delta m_x^g}{2H}.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

В результаті через елементи кватерніону похибки λ_{e1} , λ_{e2} , λ_{e3} можна сформувати вектор вимірювань Y , який по відповідних сигналах акселерометрів та магнітометрів можна обрахувати за формулою:

$$\begin{aligned}
\frac{\tilde{a}_x^g}{g} &= 2\lambda_{e2} + \frac{\Delta a_x^g}{g}, \\
\frac{\tilde{a}_y^g}{g} &= -2\lambda_{e1} + \frac{\Delta a_y^g}{g}, \\
\frac{\tilde{m}_x^g}{H} &= -2\lambda_{e2} \frac{Z}{H} - 2\lambda_{e3} + \frac{\Delta m_x^g}{H}.
\end{aligned}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \lambda_{e2} \\ \lambda_{e1} \\ \lambda_{e3} + \lambda_{e2} I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{a}_x^g}{g} \\ \frac{\tilde{a}_y^g}{g} \\ \frac{\tilde{m}_x^g}{H} \end{bmatrix}. \tag{2.45}$$

Також сформуємо вектор шумів вимірювання:

$$V = \begin{bmatrix} \frac{\Delta a_x^g}{g} \\ \frac{\Delta a_y^g}{g} \\ \frac{\Delta m_x^g}{H} \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

Використовуючи рівняння (2.45 – 2.46) запишемо рівняння вимірювань:

$$Y = D \cdot X + V, \quad (2.47)$$

де матриця вимірювань D має наступний вигляд:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2tgI & -2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.48)$$

при цьому вектор стану X залишається незмінним.

2.6 Перевірка спостережуваності системи

Для того, щоб за допомогою ОФК можна було оцінювати всі $n = 6$ введених у вектор стану $X(t)$ (2.24) похибок БКВ по вимірних похибках $Y(t)$ (2.45), необхідно, щоб виконувалася умова повної спостережуваності системи, що описується рівняннями (2.25), (2.47). У випадку постійних матриць A і D для повної спостережуваності необхідно й достатньо, щоб наступна блочна матриця – матриця спостережуваності другого роду [29]:

$$M_H = \begin{bmatrix} D \\ D \cdot A \\ D \cdot A^2 \\ \dots \\ D \cdot A^{n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

мала повний ранг, тобто ранг матриці $M_H = n = 6$. Якщо ця умова не виконується, то ранг матриці M_H дорівнює числу змінних стану системи $X(t)$ (похибок БСО) або їх незалежних лінійних комбінацій, які можна оцінити по вимірюванням (2.45).

У зв'язку з тим, що розмірність матриці D становить 3×6 , а матриці $F - 6 \times 6$, можна припустити, що ранг матриці M_H буде дорівнювати рангу матриці, що складається з перших 2-х блоків матриці (2.49). Тобто

$$M'_H = \begin{bmatrix} D \\ D \cdot F \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

Перепишемо матриці F і D у відповідності до (2.26) та (2.46) в наступному вигляді:

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0^{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2tgI & -2 \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & -\frac{1}{2}I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad F_1 = -[\tilde{\omega} \times]. \quad (2.52)$$

У відповідності до (2.50 – 2.52) запишемо матрицю спостережуваності M'_H у наступному вигляді:

$$M'_H = \begin{bmatrix} D_1 & 0^{3 \times 3} \\ D_1 \cdot F_1 & -\frac{1}{2}D_1 \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

З (6.5) видно, що визначник M'_H дорівнює:

$$\Delta[M'_H] = \Delta \begin{bmatrix} D_1 & 0^{3 \times 3} \\ D_1 \cdot F_1 & -\frac{1}{2}D_1 \end{bmatrix} = \Delta \left[-\frac{1}{2}D_1^2 \right] \neq 0.$$

В результаті аналізу матриці M'_H (2.53) було встановлено, що ранг матриці спостережуваності дорівнює 6, тобто всі 6 помилок БКВ, включених у вектор стану (2.24), є спостережуваними. Таким чином, оцінюючи за допомогою ОФК помилки БКВ, їх можна буде компенсувати.

2.7 Оцінка обчислювальних витрат одного кроку алгоритму ОФК

Для перевірки ефективності спрощення вектору вимірювання Y з шести компонентів (2.32) до трьох (2.45), виконаємо оцінку обчислювальних витрат одного кроку алгоритму ОФК. Для скористаємось виразами для оцінки кількості операцій множення та додавання, необхідних для обчислення оптимального коефіцієнта підсилення ОФК на одному кроці алгоритму [30]:

$$\begin{aligned} M &= n^2 r + 2nr^2 + r^3 \\ A &= n^2 r + 2nr^2 - 2nr + r^3 \end{aligned} \quad (2.54)$$

де M – кількість операцій множення, A – кількість операцій додавання. При цьому n – розмірність вектору стану $X(n \times 1)$, а r – розмірність вектору вимірювання $Y(r \times 1)$.

Для вектору вимірювання Y (2.32) розмірністю 6×1 :

$$\begin{aligned} M_{r=6} &= n^2 r + 2nr^2 + r^3 = 864, \\ A_{r=6} &= n^2 r + 2nr^2 - 2nr + r^3 = 792. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Для вектору вимірювання Y (2.45) розмірністю 3×1 :

$$\begin{aligned} M_{r=3} &= n^2 r + 2nr^2 + r^3 = 243, \\ A_{r=3} &= n^2 r + 2nr^2 - 2nr + r^3 = 207. \end{aligned} \quad (2.56)$$

В результаті скорочення вектору вимірювання з 6 компонентів до 3 кількість операцій множення зменшилась у 3,6 рази, та кількість операцій додавання зменшилась у 3,8 рази, що підтверджує суттєву ефективність запропонованої моделі вимірювання [31].

2.8 Оцінка і компенсація похибок системи за допомогою ОФК

Для оцінювання похибок орієнтації, заданих векторною частиною кватерніону похибки Λ_e , використаємо оптимальний фільтр Калмана. При цьому розіб'ємо алгоритм роботи на два етапи. На етапі прогнозування фільтр Калмана екстраполює значення змінних стану (2.24), а також їх невизначеності. На другому етапі, за даними вимірювань (2.45) результат екстраполяції уточняється. Завдяки покроковому

характеру алгоритму фільтра Калмана, він може в реальному часі відстежувати стан об'єкта, використовуючи тільки поточні виміри і інформацію про попередній стан і його невизначеність.

Перейдемо від неперервної моделі похибок, що описується диференціальним рівнянням стану (2.25), до еквівалентної дискретної моделі, що описується різницеvim рівнянням виду [32]:

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + W(k-1), \quad (2.57)$$

де матриця $\Phi(k, k-1)$ наближено дорівнює

$$\Phi = I_{6 \times 6} + F(t) \cdot \Delta t \quad (2.58)$$

де Δt – крок дискретизації

Після цього на етапі прогнозування обраховується матриця коваріації P^- :

$$P^- = \Phi \cdot P^+ \cdot \Phi^T + Q_d \quad (2.59)$$

де Q_d – коваріаційна матриця дисперсії шумів ДКШ.

На наступному кроці розраховується матриця коефіцієнтів підсилення фільтра Калмана:

$$K = P^- \cdot D^T \cdot (D \cdot P^- \cdot D^T + R_d)^{-1} \quad (2.60)$$

де R_d – коваріаційна матриця дисперсії шумів акселерометрів і магнітометрів.

Після чого здійснюється уточнення (корекція) матриці P^- :

$$P^+ = (I_{6 \times 6} - K \cdot D) \cdot P^- \quad (2.61)$$

В результаті оцінка вектору стану знаходиться як:

$$\tilde{X}^+ = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_e^+ \\ \Delta \tilde{B}^+ \end{bmatrix} = K \cdot Y \quad (2.62)$$

звідки оцінка кватерніону орієнтації на поточному кроці знаходиться, як добуток кватерніону з попереднього кроку та кватерніону похибки поточного кроку:

$$\hat{\Lambda}^+ = \hat{\Lambda}^- \otimes [1, \hat{\Lambda}_e^+] \quad (2.63)$$

Також оцінюється та компенсується дрейф ДКШ:

$$\tilde{B}^+ = \tilde{B}^- + \Delta \tilde{B}^+ \quad (2.64)$$

$$\tilde{\omega}^+ = \tilde{\omega}^- - \tilde{B}^+ \quad (2.65)$$

2.9 Алгоритм початкової виставки БКВ

Початкова виставка БКВ – це процедура визначення початкової орієнтації об'єкта та відповідної МНК C_0^{gb} , що проводиться за сигналами акселерометрів та магнітометрів.

Використовуючи сигнали акселерометрів, в першу чергу, можна обрахувати третій рядок матриці C_0^{gb} :

$$\begin{aligned} C_{3,1}^{gb} &= \frac{A_{x0}}{\sqrt{A_{x0}^2 + A_{y0}^2 + A_{z0}^2}}, \\ C_{3,2}^{gb} &= \frac{A_{y0}}{\sqrt{A_{x0}^2 + A_{y0}^2 + A_{z0}^2}}, \\ C_{3,3}^{gb} &= \frac{A_{z0}}{\sqrt{A_{x0}^2 + A_{y0}^2 + A_{z0}^2}}, \end{aligned} \quad (2.66)$$

де A_{x0}, A_{y0}, A_{z0} – сигнали акселерометрів, осереднені протягом часу початкової виставки.

Далі, використовуючи сигнали магнітометрів та компоненти третього рядка матриці C_0^{gb} , можна розрахувати перший рядок матриці:

$$\begin{aligned} H_{x0} &= M_{y0} \cdot C_{3,3}^{gb} - M_{z0} \cdot C_{3,2}^{gb}, \\ H_{y0} &= M_{z0} \cdot C_{3,1}^{gb} - M_{x0} \cdot C_{3,3}^{gb}, \\ H_{z0} &= M_{x0} \cdot C_{3,2}^{gb} - M_{y0} \cdot C_{3,1}^{gb}; \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} C_{1,1}^{gb} &= \frac{H_{x0}}{\sqrt{H_{x0}^2 + H_{y0}^2 + H_{z0}^2}}, \\ C_{1,2}^{gb} &= \frac{H_{y0}}{\sqrt{H_{x0}^2 + H_{y0}^2 + H_{z0}^2}}, \\ C_{1,3}^{gb} &= \frac{H_{z0}}{\sqrt{H_{x0}^2 + H_{y0}^2 + H_{z0}^2}}, \end{aligned} \quad (2.68)$$

де M_{x0}, M_{y0}, M_{z0} – сигнали магнітометрів, осереднені протягом часу початкової виставки.

Елементи другого рядка матриці C_0^{gb} розраховуються використовуючи елементи першого та третього рядків:

$$\begin{aligned} C_{2,1}^{gb} &= C_{3,2}^{gb} \cdot C_{1,3}^{gb} - C_{3,3}^{gb} \cdot C_{1,2}^{gb}; \\ C_{2,2}^{gb} &= C_{3,3}^{gb} \cdot C_{1,1}^{gb} - C_{3,1}^{gb} \cdot C_{1,3}^{gb}; \\ C_{2,3}^{gb} &= C_{3,1}^{gb} \cdot C_{1,2}^{gb} - C_{3,2}^{gb} \cdot C_{1,1}^{gb}. \end{aligned} \quad (2.69)$$

В результаті, використовуючи отриману матрицю C_0^{gb} , можна обрахувати початкові кути орієнтації об'єкта та відповідний початковий кватерніон:

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \arctg\left(\frac{C_{1,2}^{gb}}{C_{2,2}^{gb}}\right), \\ \gamma_0 &= -\arctg\left(\frac{C_{3,1}^{gb}}{C_{3,3}^{gb}}\right), \\ \theta_0 &= \arcsin(C_{3,2}^{gb}) = \arctg\left(\frac{C_{3,2}^{gb}}{\sqrt{1 - C_{3,2}^{gb^2}}}\right). \end{aligned} \quad (2.70)$$

Висновки до розділу 2

Розглянуто базовий алгоритм роботи БКВ, який побудовано на основі рівнянь орієнтації з параметрами Родриго-Гамільтона. В якості системи корекції було обрано ОФК. Для розробки алгоритму ОФК було виведено диференціальне рівняння похибок системи, а саме – рівняння, що описує поведінку кватерніону похибки у часі, використовуючи яке було отримано модель стану та сформовано відповідний вектор стану.

Для забезпечення лінійного зв'язку вектора стану та вектора вимірювання, під час складання рівняння вимірювання, було розглянуто кути похибок орієнтації. В результаті чого було отримано спрощений вектор вимірювання розмірністю 3×1 , при цьому вектор стану залишився незмінним.

Також було проведено перевірку спостережуваності системи, щоб підтвердити можливість оцінки усіх шістьох компонентів вектору стану (похибок) з використанням запропонованого вектора вимірювання. Для підтвердження

ефективності спрощення вектору вимірювання було проведено оцінку обчислювальних витрат одного кроку алгоритму ОФК.

В результаті, зменшення об'єму обчислень алгоритму дозволяє вибрати менш потужний процесор для побудови системи орієнтації, а отже – зменшити енергоспоживання системи, що є суттєвою перевагою при використанні БКВ у системах з автономним живленням.

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ БКВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОРСЬКОЇ ХВИЛІ

На сьогоднішній день визначення параметрів морської хвилі має широкий спектр застосувань, включаючи системи навігації в морських структурах, системи раннього попередження при екстремальних погодних умовах та ін. Параметри хвилі також використовуються для перевірки прогнозних моделей, які дозволяють робити локалізовані передбачення умов на кілька днів вперед.

Відомі комерційні датчики хвиль (Wave sensors) є високоточними та надійними, проте для багатьох наукових та промислових підприємств їх вартість занадто висока. В даному розділі розглянуто можливість застосування БКВ для визначення параметрів морської хвилі.

3.1 Визначення лінійних переміщень об'єкта в ГСК

Системи, що вимірюють лінійні переміщення об'єкта в площині горизонту (Heave, Surge, Sway) (рис. 3.1), називаються MRU (motion reference unit). MRU будують на базі IMU (Inertial Measurement Unit), де акселерометри вимірюють уявне прискорення, а гіроскопи абсолютні кутові швидкості в осях об'єкта. Щоб отримати переміщення об'єкта в горизонті необхідно перепроєктувати сигнали акселерометрів з осей об'єкта в горизонт і двічі проінтегрувати отримані проекції.

Проте, якщо включити в таку систему тривісний блок магнітометрів, можна отримати безплатформну курсовертикаль, використовуючи вимірювання якої, можна розрахувати проекції акселерометрів в ГСК.

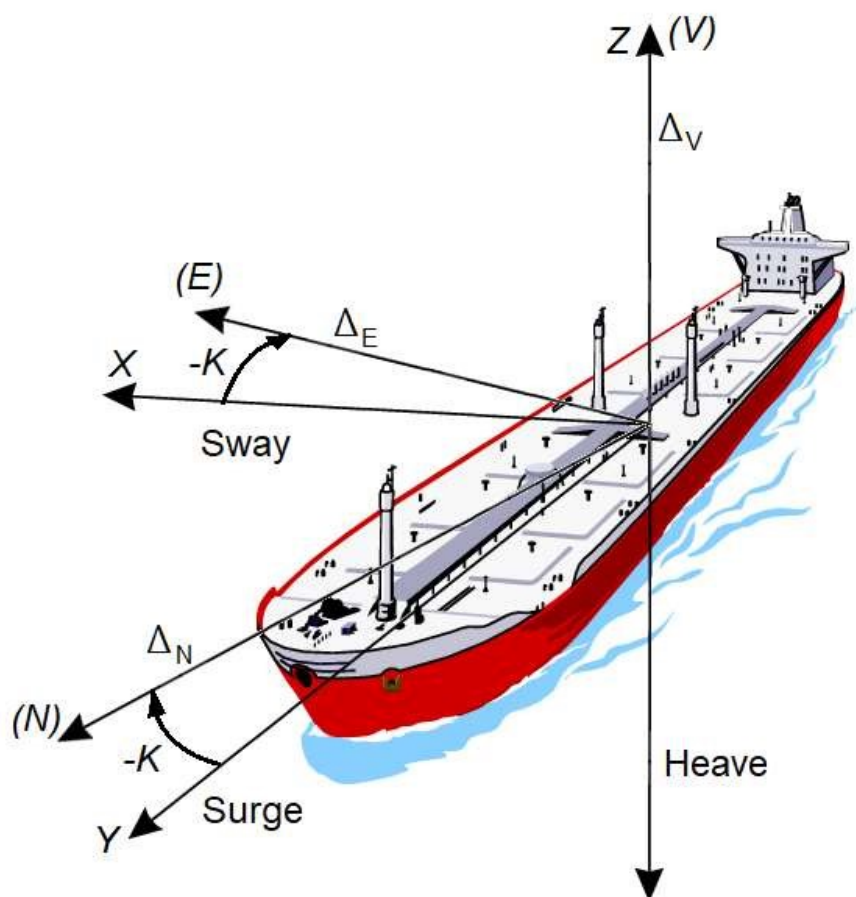


Рис. 3.1. Лінійні переміщення об'єкта в горизонті

Через помилки датчиків, такі як шум і зміщення нуля, інтегрування призводить до дрейфу вихідної величини. Для вирішення цієї проблеми зазвичай використовується смуговий фільтр. Цей фільтр будується на основі поєднання подвійного інтегратора та фільтра високих частот (ФВЧ) для видалення низькочастотних складових.

Використовуючи сигнали акселерометрів та обраховану в алгоритмі БКВ матрицю переходу від системи координат зв'язаної з об'єктом до ГСК можна розрахувати проекції прискорення об'єкта на ГСК:

$$\begin{bmatrix} a_E \\ a_N \\ a_V \end{bmatrix} = C^{gb} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де E – east (схід), N – north (північ), V – vertical (вертикаль).

Подвійний інтегруючий фільтр, що давить постійну складову, або складову сигналу, що повільно змінюється в часі, являє собою комбінацію двох інтегруючих ланок і 3-х ВЧ фільтрів (рис. 3.2).

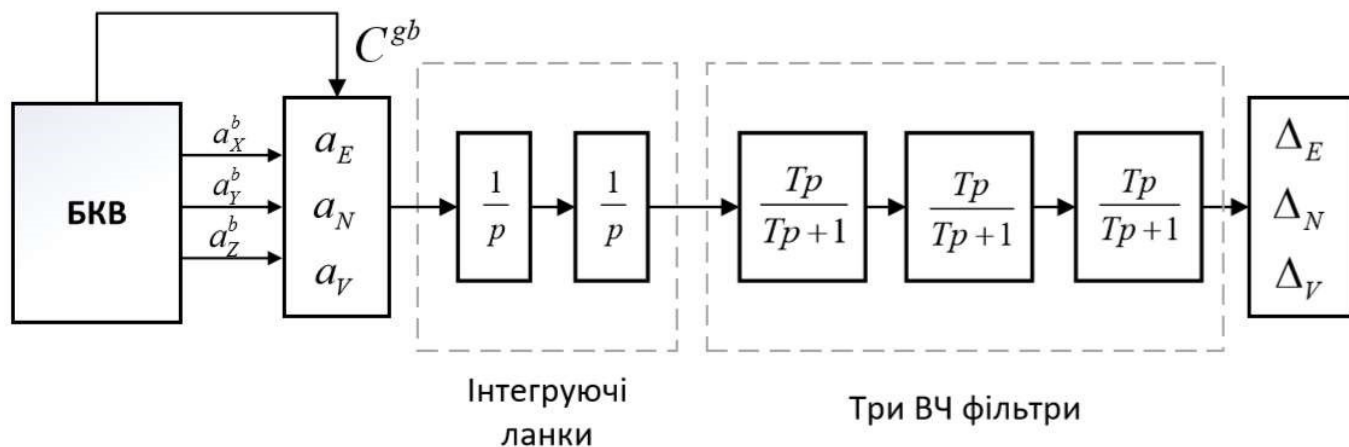


Рис. 3.2. Схема розрахунку лінійних переміщень об'єкта

Відповідно до рисунку 3.2 загальна передатна функція визначення лінійний переміщень об'єкта $W(p)$ має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{Tp}{Tp+1} \cdot \frac{Tp}{Tp+1} \cdot \frac{Tp}{Tp+1} = \frac{T^3 p}{(Tp+1)^3}. \quad (3.2)$$

На рисунку 3.3 зображені логарифмічні амплітудо-частотні (ЛАЧХ) та фазо-частотні (ЛФЧХ) характеристики подвійної інтегруючої ланки та загальної передатної функції $W(p)$ (3.2) зі значенням частоти $f = 0.05$ Гц, де $T = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f) \approx 3.1831$ с.

Типова смуга частот для хвилі становить від 0.05 Гц і 0.2 Гц. Оптимальна фаза -180° досягається сумарною схемою фільтрації тільки на частотах більше, ніж приблизно 0,15 Гц, при налаштуванні основного фільтра на частоту 0.05 Гц. На цих частотах, фільтр діє майже як подвійний інтегратор. Помилка фази для більш низьких частот призводить до появи похибок визначення лінійних переміщень об'єкта, тому, в такому випадку, потрібна корекція фази і амплітуди, що проводиться за допомогою введення спеціальних коригуючих ланок.

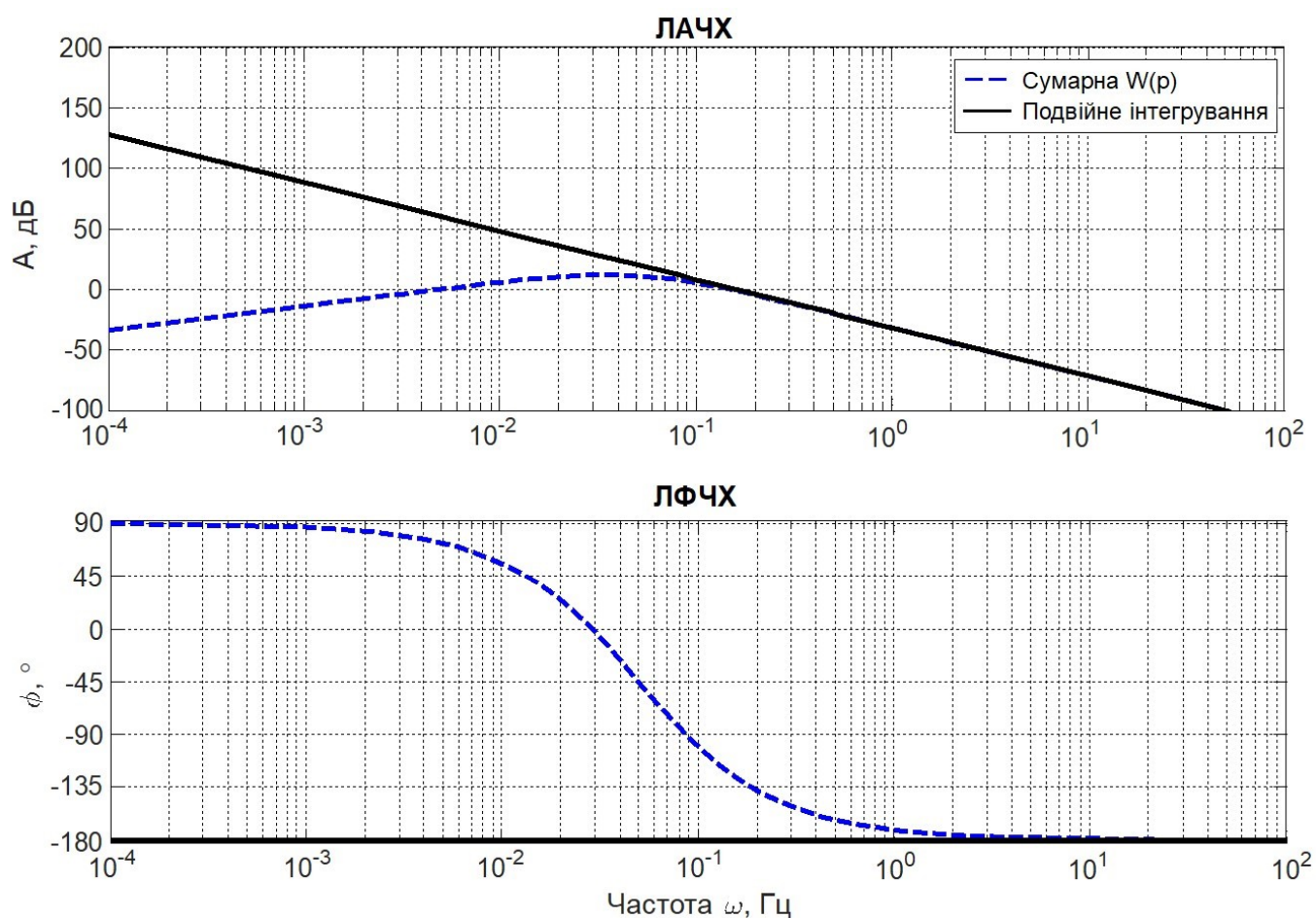


Рис. 3.3. ЛАЧХ і ЛФЧХ подвійної інтегруючої ланки
та сумарної передатної функції $W(p)$

3.2 Розрахунок параметрів морської хвилі

Сформувавши числові ряди переміщень об'єкта у східному, північному та вертикальному напрямку, отриманих в результаті подвійного інтегрування прискорень об'єкта, можна обчислити відповідні ряди Фур'є.

Кожен ряд Фур'є складається з набору відповідних коефіцієнтів Фур'є, які в свою чергу складаються з реальної і уявної частини. Таким чином, можна обрахувати шість компонентів Фур'є α_f^E , β_f^E , α_f^N , β_f^N , α_f^V , β_f^V на кожній частоті f , які у векторній формі мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
A_f^E &= \alpha_f^E + i \cdot \beta_f^E, \\
A_f^N &= \alpha_f^N + i \cdot \beta_f^N, \\
A_f^V &= \alpha_f^V + i \cdot \beta_f^V.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Виходячи з цього, можна обрахувати відповідні ко-спектри C_f^{jk} і квадратурні спектри Q_f^{jk} , де j, k – індекси відповідних проекції (E, N, V):

$$\begin{aligned}
C_f^{EE} &= \overline{A_f^E} \cdot \overline{A_f^E} = \alpha_f^E \alpha_f^E + \beta_f^E \beta_f^E, \\
C_f^{NN} &= \overline{A_f^N} \cdot \overline{A_f^N} = \alpha_f^N \alpha_f^N + \beta_f^N \beta_f^N, \\
C_f^{VV} &= \overline{A_f^V} \cdot \overline{A_f^V} = \alpha_f^V \alpha_f^V + \beta_f^V \beta_f^V, \\
C_f^{NE} &= \overline{A_f^N} \cdot \overline{A_f^E} = \alpha_f^N \alpha_f^E + \beta_f^N \beta_f^E, \\
C_f^{NV} &= \overline{A_f^N} \cdot \overline{A_f^V} = \alpha_f^N \alpha_f^V + \beta_f^N \beta_f^V, \\
C_f^{EV} &= \overline{A_f^E} \cdot \overline{A_f^V} = \alpha_f^E \alpha_f^V + \beta_f^E \beta_f^V, \\
C_f^{EN} &= C_f^{NE}, \quad C_f^{VN} = C_f^{NV}, \quad C_f^{VE} = C_f^{EV}.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
Q_f^{VN} &= \overline{A_f^V} \times \overline{A_f^N} = \alpha_f^V \beta_f^N - \beta_f^V \alpha_f^N, \\
Q_f^{VE} &= \overline{A_f^V} \times \overline{A_f^E} = \alpha_f^V \beta_f^E - \beta_f^V \alpha_f^E, \\
Q_f^{NV} &= -Q_f^{VN}, \quad Q_f^{EV} = -Q_f^{VE},
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Однак не всі компоненти потрібно обчислювати. За визначенням:

$$Q_f^{EE} = Q_f^{NN} = Q_f^{VV} = 0. \tag{3.6}$$

Крім того, Q_f^{jk} представляє собою обертання. Для прикладу, хвиля, що котиться на захід, матиме компонент обертання, спрямований на північ (правосторонній гвинт), тому $Q_f^{EV} = -Q_f^{VE} \neq 0$. Компонент повороту, спрямований вертикально, представляв би вихрові потоки, які не є частиною фізики хвиль, тому можна прийняти, що:

$$Q_f^{EN} = Q_f^{NE} = 0. \tag{3.7}$$

В результаті, використовуючи обраховані компоненти спектрів (3.4-3.7), можна сформулювати відповідні матриці для ко-спектрів та квадратурних спектрів:

$$C_f = \begin{bmatrix} C_f^{EE} & C_f^{EN} & C_f^{EV} \\ C_f^{NE} & C_f^{NN} & C_f^{NV} \\ C_f^{VE} & C_f^{VN} & C_f^{VV} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

$$Q_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Q_f^{EV} \\ 0 & 0 & Q_f^{NV} \\ Q_f^{VE} & Q_f^{VN} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Використовуючи компоненти отриманих матриць (3.8-3.9) можна отримати повний набір інформативних хвильових параметрів, таких як: напрямок хвилі, розповсюдження напрямку, хвильова еліптичність, період хвилі, спектральна щільність потужності (СЩП) та енергія хвилі [33].

В першу чергу, для розрахунку параметрів хвилі, необхідно визначити переважаючу частоту f , що відповідатиме необхідним коефіцієнтам Фур'є α_f^{jk} та β_f^{jk} . Обрахувавши значення СЩП для кожної частоти f , необхідно виділити максимальне значення потужності та відповідну їй частоту. Таким чином, можна обрахувати переважаючу частоту хвилі f_{\max} та відповідні коефіцієнти перетворення Фур'є.

Використовуючи обраховані компоненти ко-спектрів $C_{f_{\max}}^{jk}$ та квадратурних спектрів $Q_{f_{\max}}^{jk}$ (далі індекс f_{\max} буде опущено), що відповідають переважаючій частоті f_{\max} , можна обрахувати перші чотири коефіцієнти Фур'є нормалізованого спрямованого розподілу хвилі $G(\theta, f_{\max})$:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{Q^{NV}}{\sqrt{(C^{NN} + C^{EE})C^{VV}}}, \\ b_1 &= \frac{Q^{EV}}{\sqrt{(C^{NN} + C^{EE})C^{VV}}}, \\ a_2 &= \frac{C^{NN} - C^{EE}}{C^{NN} + C^{EE}}, \\ b_2 &= \frac{2C^{NE}}{C^{NN} + C^{EE}}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$G(\theta, f_{\max}) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta + a_2 \cos 2\theta + b_2 \sin 2\theta + \dots \right\}. \quad (3.11)$$

Також можлива інша форма запису нормалізованого спрямованого розподілу хвилі $G(\theta, f)$:

$$G(\theta, f_{\max}) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} + m_1 \cos(\theta - \theta_0) + m_2 \cos 2(\theta - \theta_0) + n_2 \sin 2(\theta - \theta_0) + \dots \right\}, \quad (3.12)$$

де:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \arctan(b_1, a_1), \\ m_1 &= \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \\ m_2 &= a_2 \cos 2\theta_0 + b_2 \sin 2\theta_0, \\ n_2 &= -a_2 \sin 2\theta_0 + b_2 \cos 2\theta_0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Коефіцієнти m_i та n_i відомі як центровані коефіцієнти Фур'є [34] або як друга гармоніка розподілу спрямованої енергії, приведена до середнього напрямку хвилі.

Напрямок хвилі D відповідає куту між напрямом руху хвилі та напрямом на північ, та розраховується за наступною формулою:

$$D = \theta_0 = \arctan(b_1, a_1) = \arctan(Q^{EV}, Q^{NV}).$$

Спрямоване розповсюдження хвилі S :

$$S = \sqrt{2 - 2m_1}.$$

Еліптичність хвилі ε – коефіцієнт, що описує форму хвилі:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{C^{VV}}{C^{NN} + C^{EE}}}.$$

Спектральна щільність потужності:

$$PSD = C^{VV}.$$

Енергія хвилі:

$$E = \int PSD.$$

Період хвилі T :

$$T = \frac{1}{f_{\max}}.$$

Висновки до розділу 3

Розглянуто можливість застосування БКВ у якості датчика для вимірювання параметрів морської хвилі.

Представлено схему визначення лінійних переміщень об'єкта на основі сигналів акселерометрів з використанням обрахованої в алгоритмі БКВ матриці C^{gb} . Розглянуто можливість застосування перетворення Фур'є для визначення переважаючої частоти хвилі та відповідних коефіцієнтів розкладу в ряд Фур'є для переміщень об'єкта.

Розглянуто традиційний метод розрахунку хвильових коефіцієнтів Фур'є, використовуючи які можна розрахувати основні параметри хвилі. Представлено формули для розрахунку напрямку хвилі D , еліптичності ε , спектральної щільності потужності PSD , енергії E та періоду хвилі T .

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даному розділі наведено результати експериментальних перевірок роботи алгоритму БКВ та алгоритму оцінки параметрів морської хвилі.

4.1 Дослідження базового алгоритму роботи БКВ

Для проведення експериментальної перевірки алгоритму роботи БКВ використовувалась безплатформна інерціальна курсовертикаль AHRS-10 (рис. 4.1) [35] компанії Inertial Labs.



Рис. 4.1. Безплатформна інерціальна курсовертикаль AHRS-10

Використовуючи сигнали AHRS-10 було проведено напівнатурне моделювання алгоритму роботи БКВ з ОФК в середовищі MATLAB R2017b. Для перевірки коректності та точності роботи алгоритму було проведено випробування в режимі статика та динаміка.

5.1.1 Статична перевірка алгоритму роботи БКВ

Для перевірки точності алгоритму роботи БКВ у статистиці було здійснено штатний пуск АНRS-10 в нерухомому положенні тривалістю 60 секунд на частоті 100 Гц. В результаті якого було отримано сигнали ДКШ (рис. 4.2), акселерометрів (рис. 4.3) та магнітометрів (рис. 4.4), та відповідні кути орієнтації.

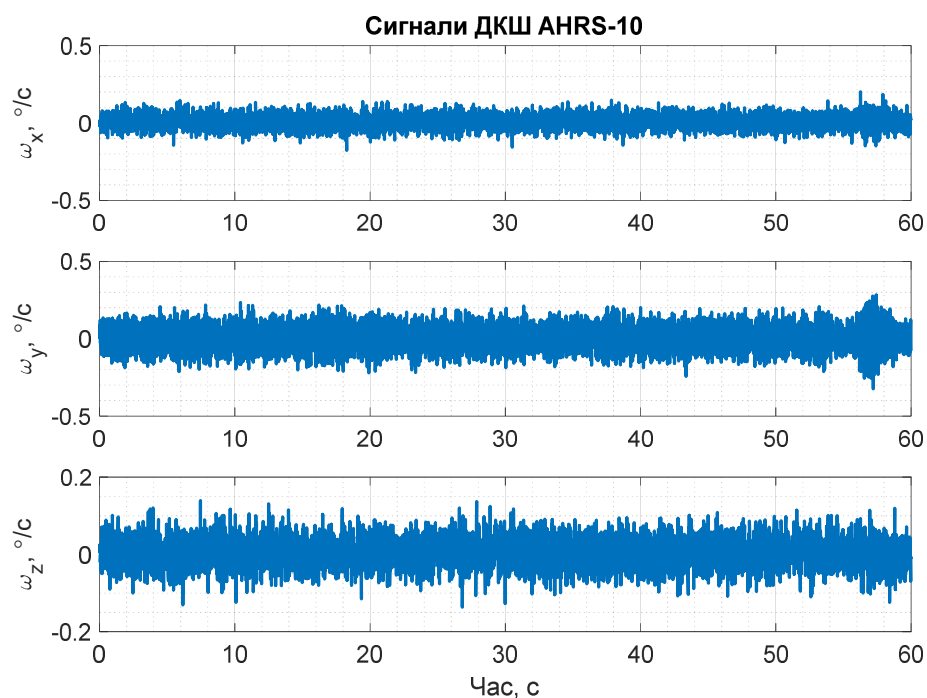


Рис. 4.2. Сигнали ДКШ АНRS-10 (статика)

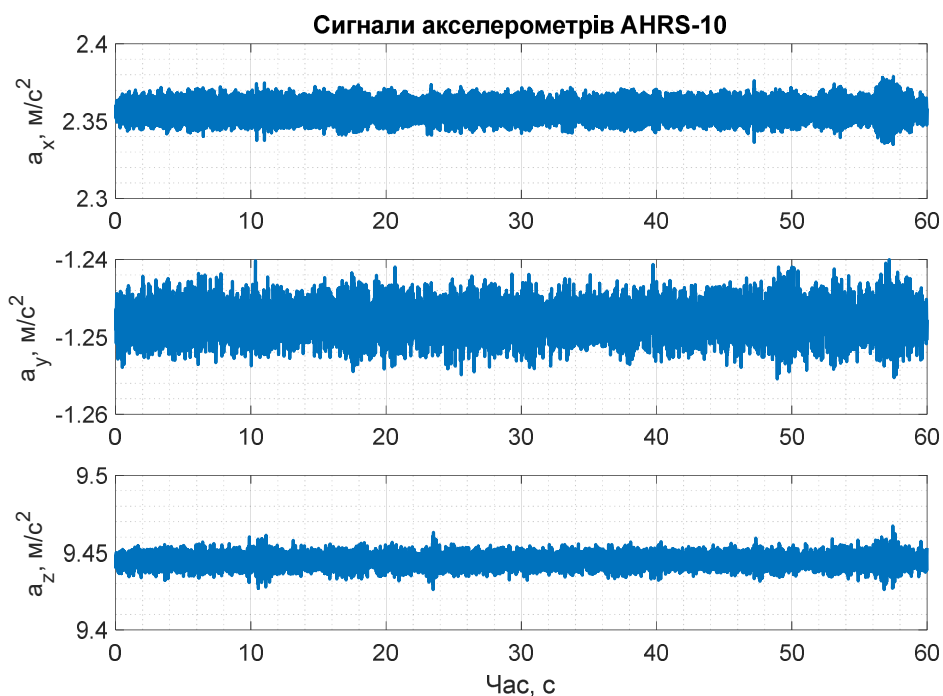


Рис. 4.3. Сигнали акселерометрів АНRS-10 (статика)

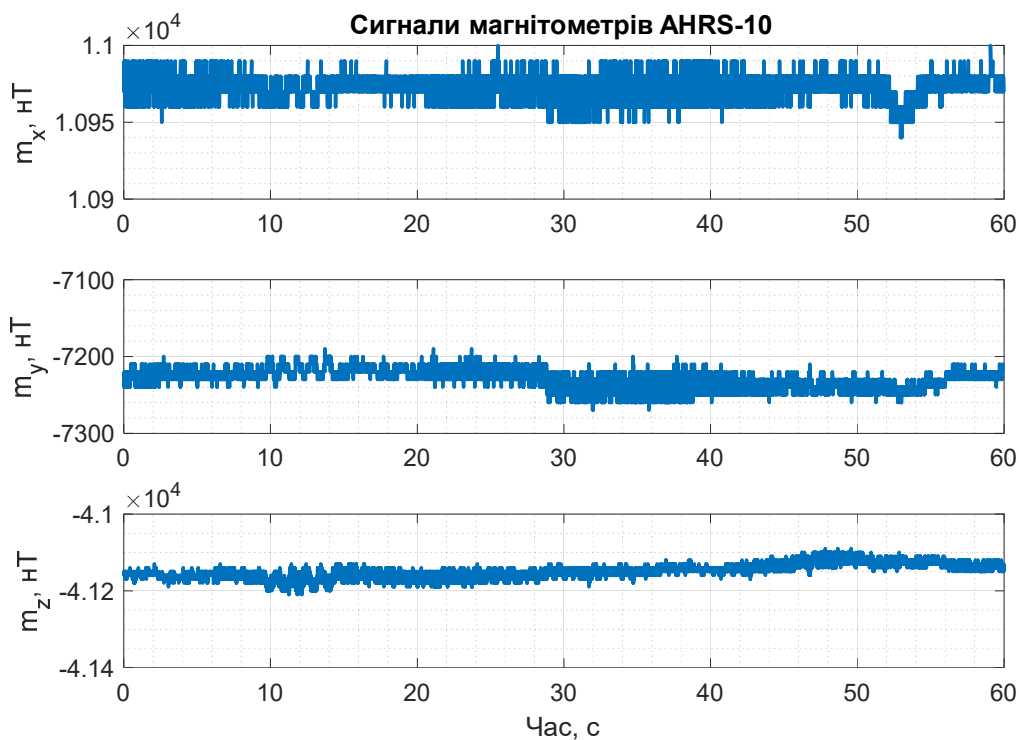


Рис. 4.4. Сигнали магнітометрів AHRS-10 (статика)

На рисунку 4.5 зображені кути орієнтації обраховані з використанням алгоритму БКВ з ОФК та кути AHRS-10.

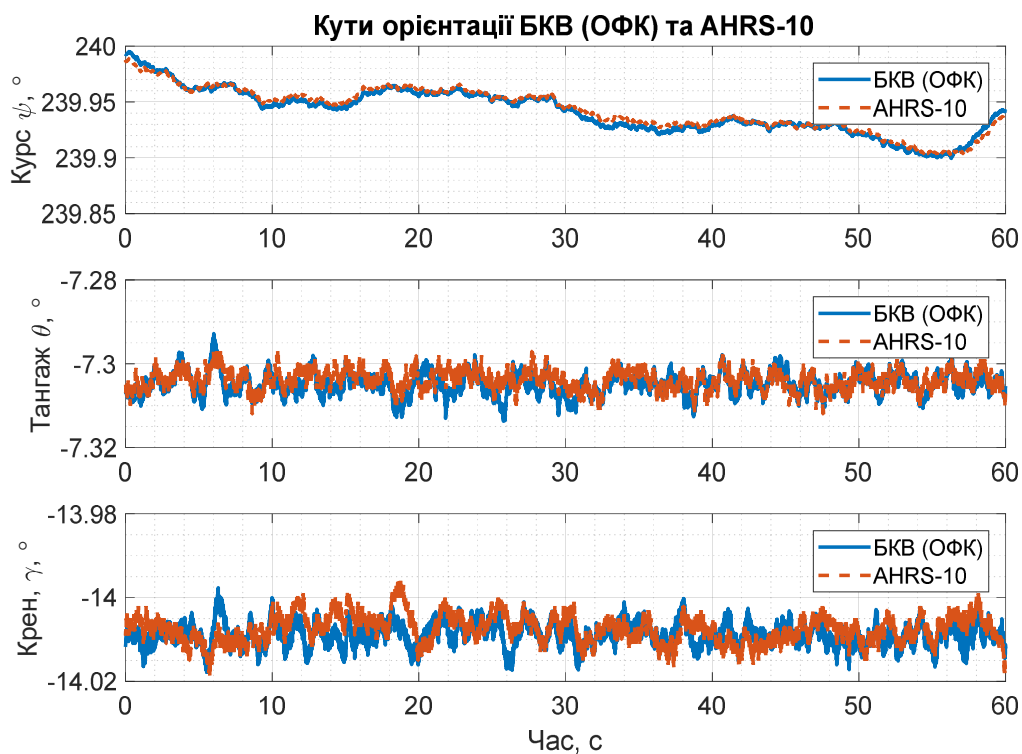


Рис. 4.5. Кути орієнтації БКВ (ОФК) та AHRS-10 (статика)

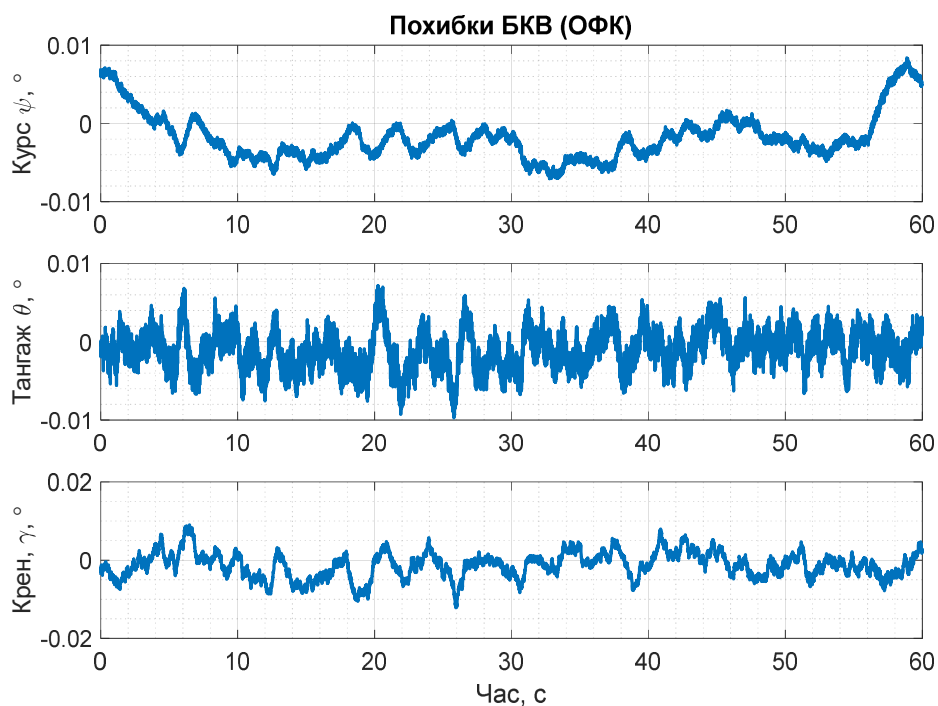


Рис. 4.6. Похибки оцінки орієнтації БКВ (статика)

5.1.2 Динамічна перевірка алгоритму роботи БКВ

Аналогічно п.4.1.1 було проведено штатний пуск АНRS-10 у динамічному режимі. Сигнали датчиків зображені на рисунках 4.7–4.9.

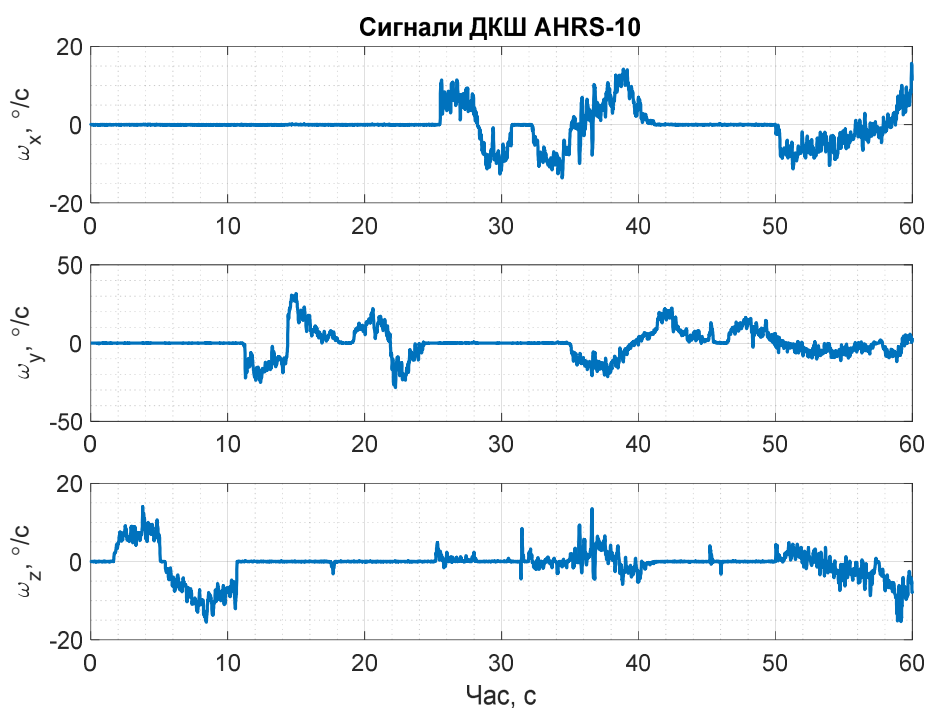


Рис. 4.7. Сигнали ДКШ АНRS-10 (динаміка)

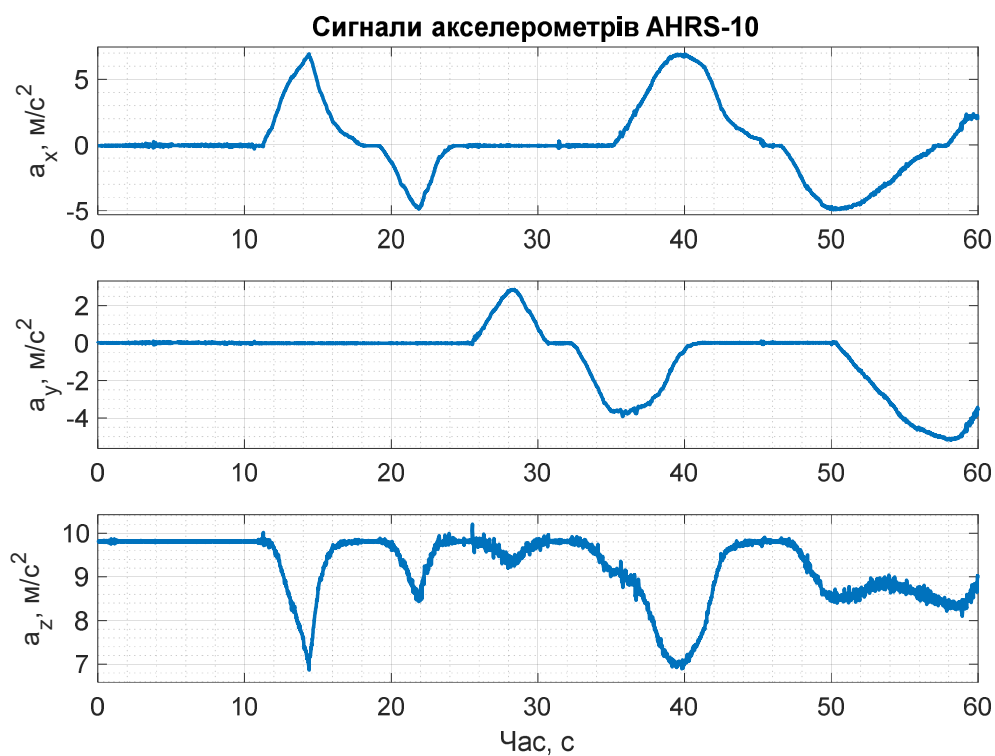


Рис. 4.8. Сигнали акселерометрів AHRS-10 (динаміка)

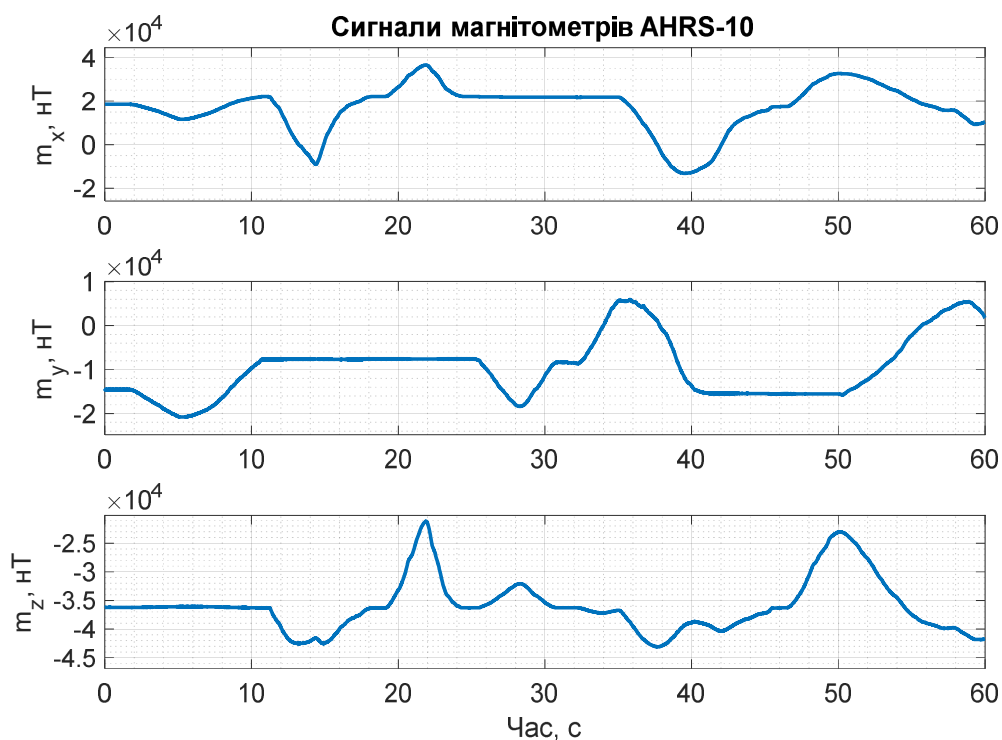


Рис. 4.9. Сигнали магнітометрів AHRS-10 (динаміка)

На рисунку 4.10 зображені порівняльні графіки кутів орієнтації обрахованих з використанням алгоритму БКВ (ОФК) та AHRS-10.

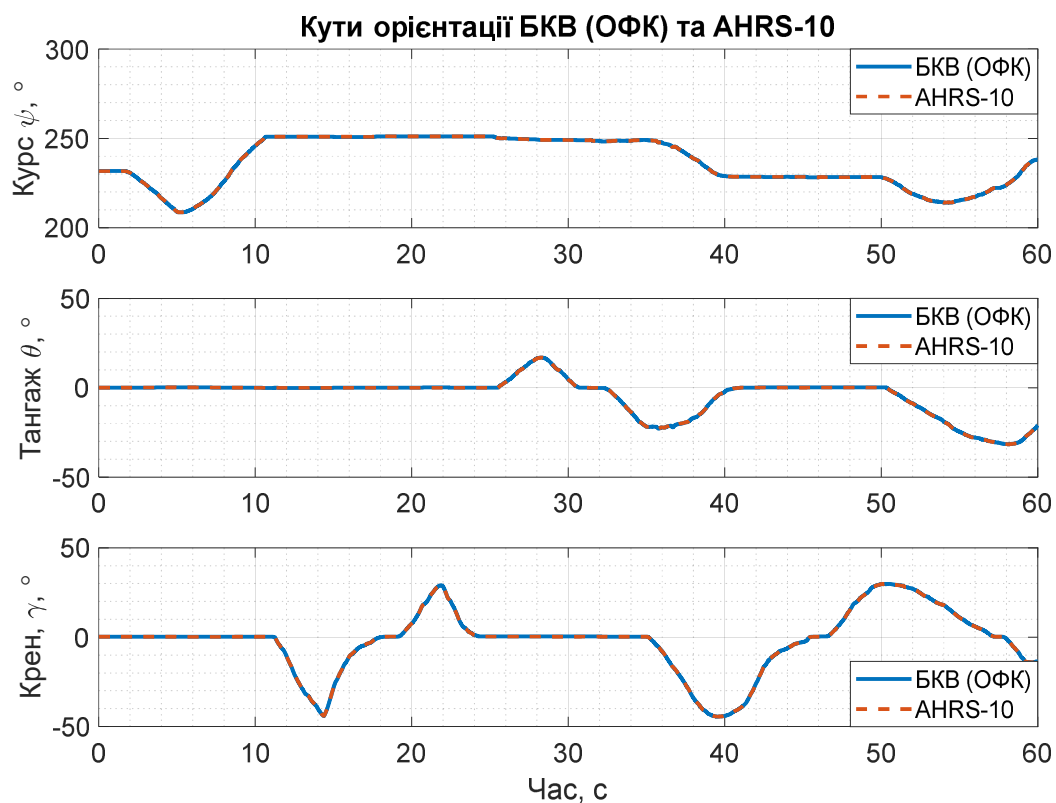


Рис. 4.10. Кути орієнтації БКВ (ОФК) та AHRS-10 (динаміка)

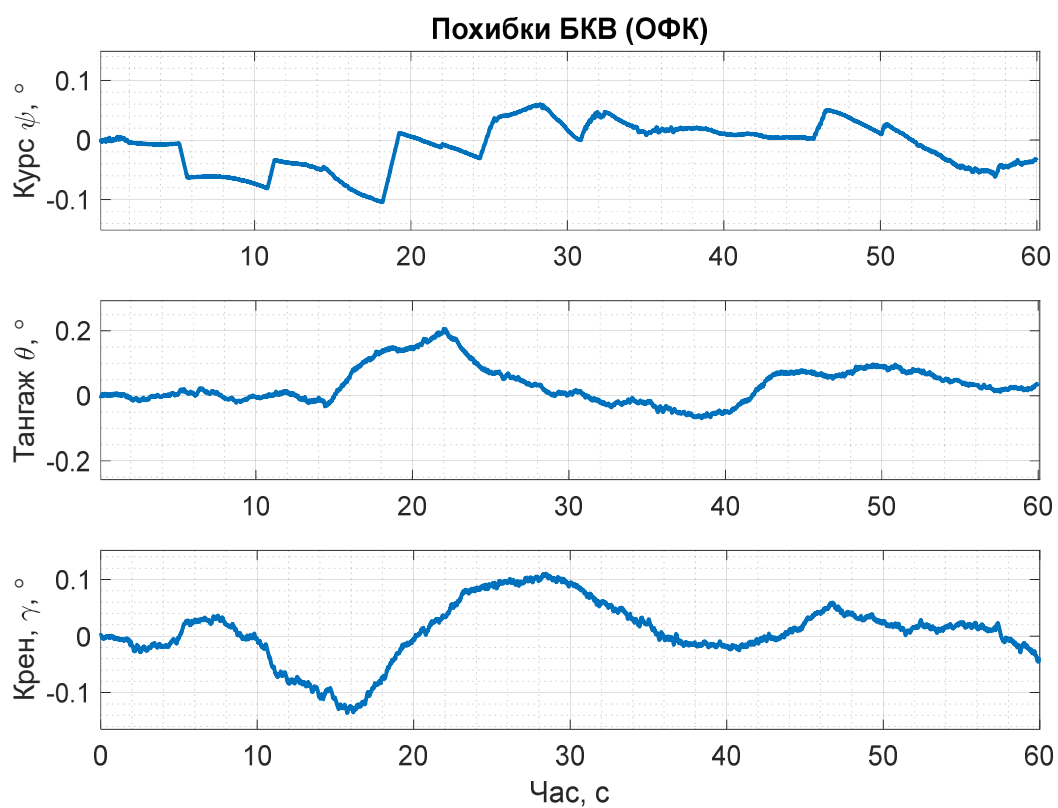


Рис. 4.11. Похибки оцінки орієнтації БКВ (динаміка)

Кути орієнтації АНRS-10 було прийнято за еталонні, тому під похибками оцінки орієнтації БКВ (рис. 4.6, 4.11) розуміється відмінність кутів орієнтації БКВ (ОФК) та АНRS-10 .

У таблицях 4.1–4.2 наведені кількісні оцінки результатів моделювання алгоритму роботи БКВ (ОФК) та пусків АНRS-10. Також наведено оцінки похибок визначення кутів орієнтації за допомогою БКВ з ОФК.

Таблиця 4.1. Оцінка результатів моделювання (статика)

Параметр	Курс	Тангаж	Крен
СКО кутів (БКВ), °	0.02003	0.00276	0.00287
СКО кутів (АНRS-10), °	0.01953	0.00247	0.00337
Серед. знач. (БКВ), °	239.941	-7.305	-14.009
Серед. знач. (АНRS-10), °	239.943	-7.304	-14.008
СКО похибки, °	0.00296	0.00254	0.00329
Серед. знач. похибки, °	-0.00177	-0.00104	-0.00129
Мін похибки, °	-0.00707	-0.00971	-0.01094
Мах похибки, °	0.00839	0.00717	0.00903
Амплітуда похибки, °	0.00773	0.00844	0.00998

Таблиця 4.2. Оцінка результатів моделювання (динаміка)

Параметр	Курс	Тангаж	Крен
СКО похибки, °	0.0385	0.0583	0.0529
Серед. знач. похибки, °	-0.0100	0.0350	0.0077
Мін похибки, °	-0.1045	-0.0686	-0.1363
Мах похибки, °	0.0597	0.2071	0.1105
Амплітуда похибки, °	0.0821	0.1379	0.1234

4.2 Дослідження алгоритму визначення параметрів морської хвилі

В ході роботи, для проведення експериментальних досліджень алгоритму визначення параметрів морської хвилі з використанням вимірювань курсовертикалі було спроектовано та побудовано випробувальний стенд імітації руху об'єкта на хвилі (рис. 4.12). Шляхом спостережень було встановлено, що траєкторія руху океанічного буя на хвилі максимально наближена до кола, що пояснює ідею випробувального стенду.



Рис. 4.12. Випробувальний стенд імітації руху об'єкта на хвилі

В ході експериментальних досліджень у якості курсовертикалі використовувалась безплатформна морська інерціальна курсовертикаль MRU (рис. 4.1) [36] компанії Inertial Labs.

Для перевірки коректності роботи алгоритму оцінки параметрів хвилі з використанням вимірювань БКВ було здійснено штатний пуск MRU (рух по колу за

годинниковою стрілкою в площині рисунку з періодом 6...7 секунд) тривалістю 300 секунд на частоті 100 Гц.



Рис. 4.13. Безплатформна інерціальна курсовертикаль MRU

В результаті якого було отримано сигнали ДКШ (рис. 4.14), акселерометрів (рис. 4.15) та магнітометрів (рис. 4.16), та відповідні кути орієнтації (рис. 4.17).

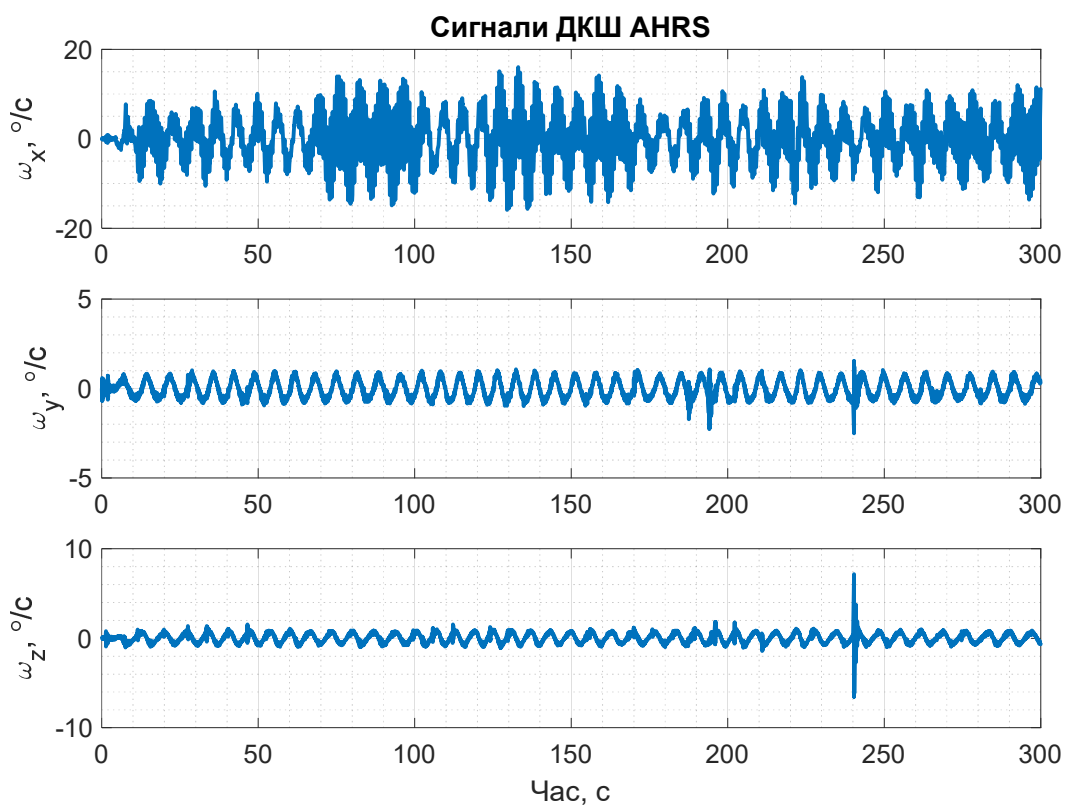


Рис. 4.14. Сигнали ДКШ MRU

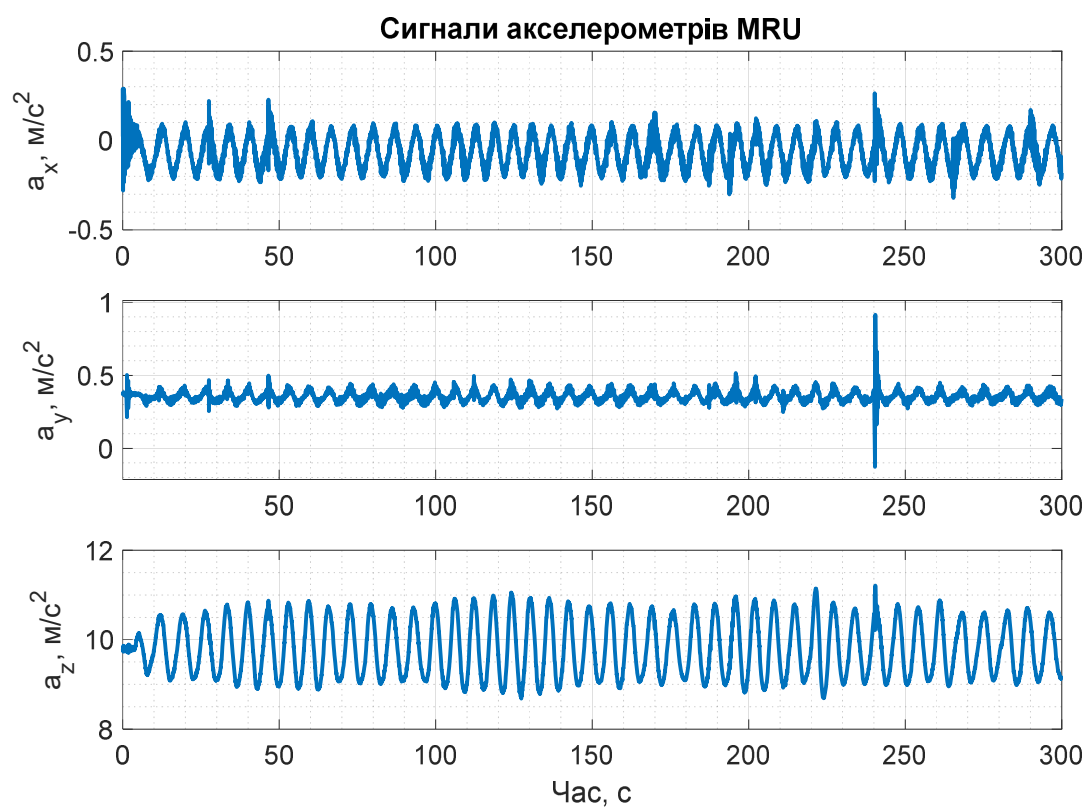


Рис. 4.15. Сигнали акселерометрів MRU

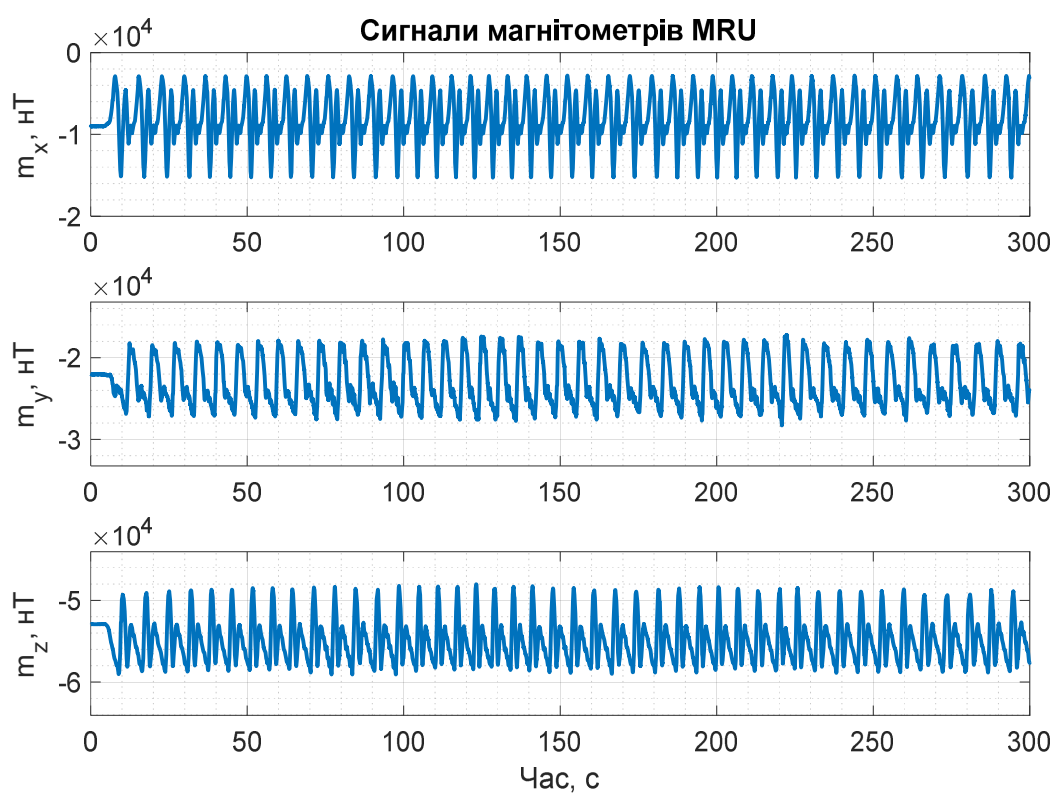


Рис. 4.16. Сигнали магнітометрів MRU

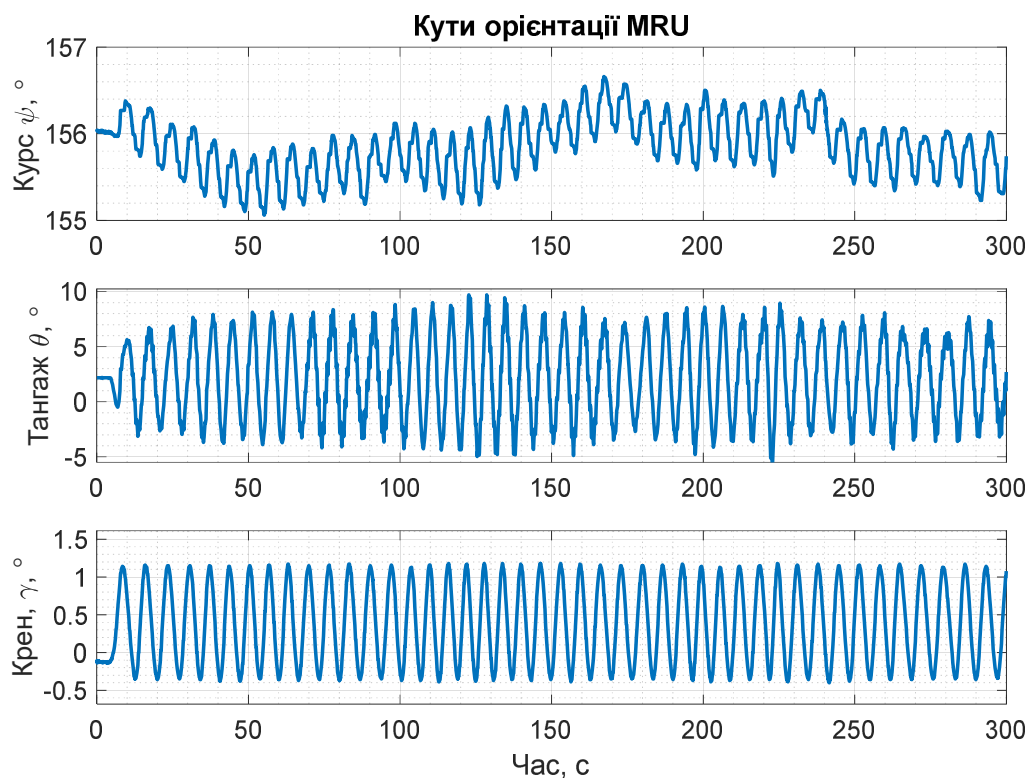


Рис. 4.17. Кути орієнтації MRU

Лінійні переміщення MRU в горизонтальній площині Surge, Sway, Heave зображені на рисунку 4.18.

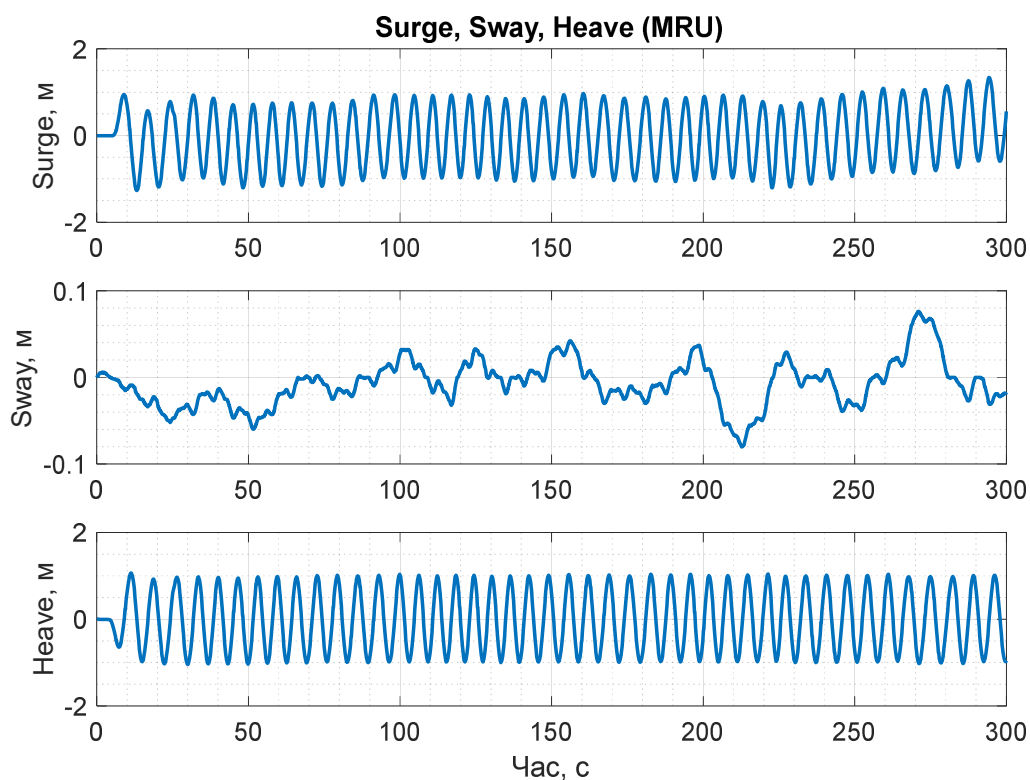


Рис. 4.18. Surge, Sway, Heave (MRU)

Розраховані лінійні переміщення MRU в ГСК зображені на рисунку 4.19.

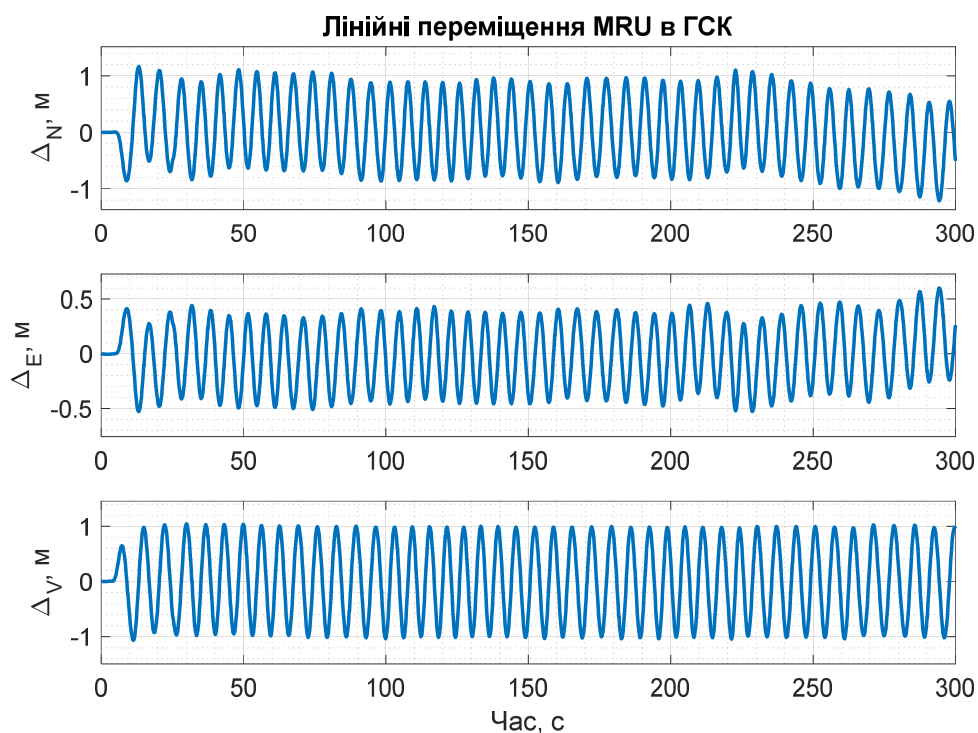


Рис. 4.19. Лінійні переміщення MRU в ГСК

На рисунках 4.20-4.22 зображено основні розраховані параметри імітованої хвилі, такі як: напрямок, період, енергія, еліптичність та спектральна щільність потужності хвилі.

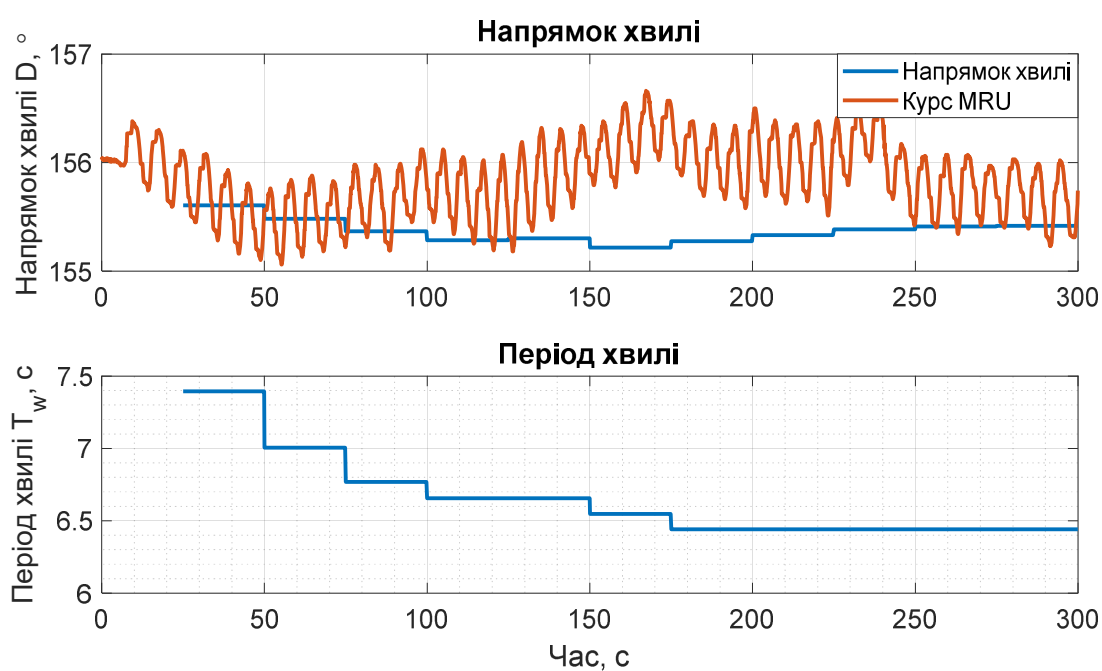


Рис. 4.20. Напрямок та період імітованої хвилі

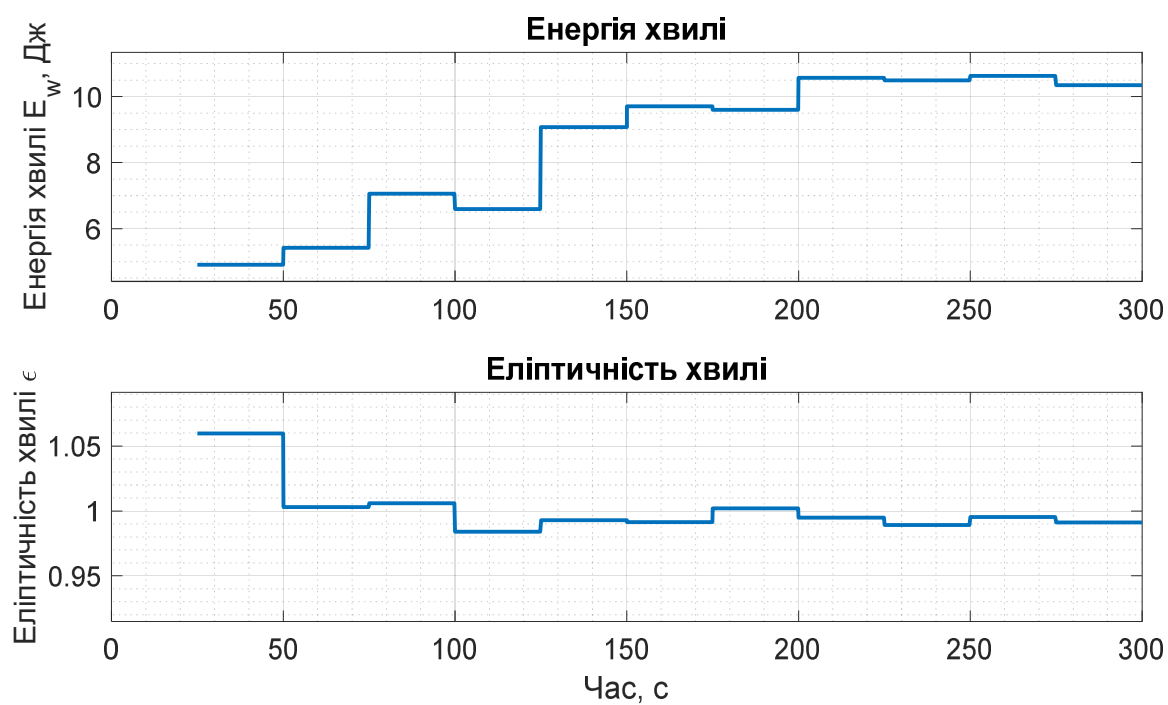


Рис. 4.21. Енергія та еліптичність імітованої хвилі

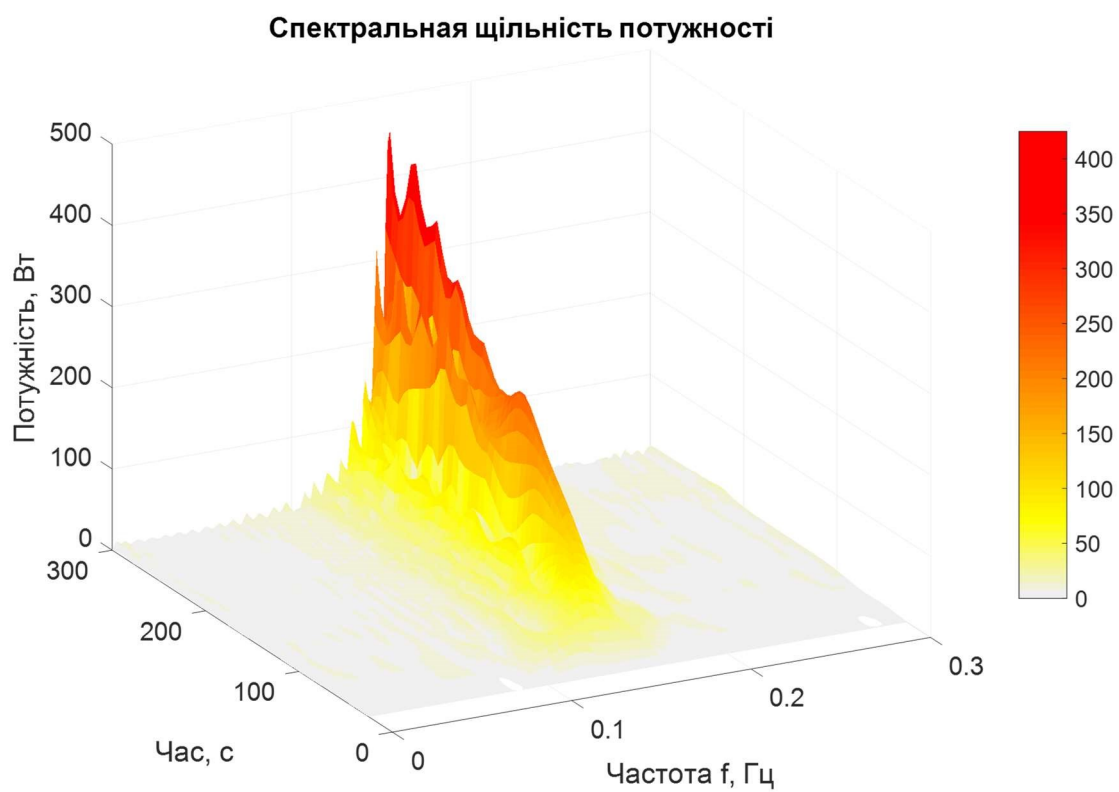


Рис. 4.22. Спектральна щільність потужності імітованої хвилі

Висновки до розділу 4

Результати напівнатурного моделювання алгоритму роботи БКВ (ОФК) з використанням спрощеного вектору вимірювань підтверджують ефективність застосування запропонованого алгоритму. Основні параметри похибок оцінки орієнтації в статиці не перевищують 0.01° , в той час як динамічна похибка не перевищує 0.15° , при цьому обчислювальні витрати одного кроку алгоритму майже в 4 рази менші, у порівнянні з відомими аналогами.

В ході дослідження алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань курсовертикалі було побудовано випробувальний стенд імітації руху об'єкта на хвилі. В результаті проведеного експерименту було отримано графіки основних параметрів хвилі, що свідчать про коректність роботи запропонованого алгоритму.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «МІКРОМЕХАНІЧНА КУРСОВЕРТИКАЛЬ З АЛГОРИТМОМ РОБОТИ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА»

5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

5.1.1 Зміст ідеї полягає у розробці та впровадженні алгоритмів компенсації похибок оцінки орієнтації об'єкта безплатформною курсовертикаллю для забезпечення стабільної роботи з високою точністю в динамічних умовах та при наявних збуреннях. Проведено аналіз можливих напрямків застосування, а також основних переваг та вигоди, що може отримати потенційний користувач у різних напрямках застосування (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Алгоритмічне підвищення точності та компенсація похибок мікромеханічної курсовертикалі з використанням оптимального фільтра Калмана	Авіація	Підвищення точності визначення орієнтації авіаційної техніки в високодинамічних умовах
	Морська справа	Забезпечення точної оцінки орієнтації судна в умовах хитавиці
	Військова промисловість	Підвищення точності систем наведення зняття
	Навігаційне обладнання	Покращення навігаційних систем для стабілізації супутникових антен, керування безпілотними літальними апаратами
	Гірнична промисловість	Покращення систем контролю кутів нахилу шахт та свердловин, покращення стабілізації

		землерийних машин (бурових установок)
	Архітектура та будівельна промисловість	Покращення систем контролю кутів нахилу опор архітектурних споруд, мостів, трубопроводів та транспортних магістралей
	Робототехніка	Покращення систем орієнтації та навігації для мобільних роботів
	Медицина	Покращення стабілізації мікроінструментів, діагностичної апаратури
	Побутова електроніка	Покращення стабілізації зображень у фото- та відеокамерах, пристроях для віртуальних комп'ютерних ігор тощо.

Висновки: Як видно з таблиці 5.1, існує доволі багато сфер, де використання запропонованої ідеї є актуальним. Потенційних споживачів можна знайти у цивільних сферах, таких як авіація, морська справа, архітектура, побутова електроніка, робототехніка, медицина та інших сферах, де використовуються системи орієнтації та навігації, а також у військовій сфері. З таблиці також видно, що для потенційних користувачів існує багато вигоди.

5.1.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї, основні відмінності від аналогів, які вже існують, а також товарів-замінників (табл. 5.2). Порівняння із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попередніх конкурентів;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що

мають:

- а) гірші значення (W, слабкі);

- б) аналогічні (N, нейтральні) значення;
в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Відомі аналоги			
1	Вартість програмного забезпечення	500 ум.од.	2500 - 4000 ум.од.			Відносно низька вартість програмного забезпечення
2	Швидкодія	250 Гц	100-200 Гц		Швидкодія приблизно однакова	
3	Простота алгоритму	85%	70%		Алгоритм дещо простіший	
4	Гнучкість	90%	50%			Значана перевага у гнучкості
5	Точність показників (наявність похибок)	Найвища/ похибки зведені до мінімуму	Висока/ наявні похибки			Значно вища точність та мінімальна наявність похибок

Висновки: Було визначено, що потенційними конкурентами проекту можуть виступати всі виробники систем орієнтації (БКВ) та програмного забезпечення для них. Проведено порівняння основних техніко-економічних характеристик. При

цьому, як видно з таблиці 5.2, проект має виключні переваги з усіх показників, оскільки і був створений з метою покращення будь-якого приладу, який створюють конкуренти. Тобто, можна зробити також висновок, що всі потенційні конкуренти одночасно виступають і потенційними клієнтами, що спрощує вихід продукту на ринок.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею проекту (табл. 5.3). Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Існування таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Отримання патенту	Офіційні права на розробку ідеї, підтвердження авторства	Наявна	Доступна
2	Підвищення точності системи	Вдосконалення алгоритму роботи системи	Потрібно вдосконалити наявну розробку	Доступна
3	Спрощення реалізації алгоритмів на практиці	Вдосконалення програмного коду, розробка спеціальних інструкцій	Розробити	Доступна
4	Підвищити точність обробки вхідних даних	Оптимізація швидкодії алгоритму	Розробити	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення точності БКВ та забезпечення компенсації похибок системи				

Висновки: За таблицею 5.3 обрано наступну технологію реалізації проекту – підвищення точності системи, це є найбільш привабливим для користувачів, тому що систему легко буде підлаштовувати під різноманітні вхідні параметри і використовувати для різноманітного обладнання. Цю технологію потрібно розробити, що підвищує унікальність. Всі описані технології реалізації є доступними.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

5.3.1 Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 5.4), ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та суднобудівну сферу, медицину, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову, авіа- та суднобудівну сферу, медицину)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	48%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження в зв'язку з гарною рентабельністю і загальним обсягом продаж. Існують певні обмеження, які

стосуються просування товару на ринок військової та медичної, де потрібно виконання специфічних умов на стандартизації та сертифікацію. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 7, що є досить оптимальною конкуренцією.

5.3.2 Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, на основі цього формується основний список вимог до товару (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. 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	Підвищення точності показників приладів (компенсація похибок БКВ)	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, архітектура та будівельна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	<ul style="list-style-type: none"> - Для військової та медичної сфери особливості пов'язані з стандартизацією і сертифікацією. - Для авіаційної і морської техніки важливішою є точність. - Для автомобільної промисловості, розробки навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, важливішим є простота впровадження 	<ul style="list-style-type: none"> - Точність показників - Швидкодія алгоритму - Надійність - Адаптивність - Простота та легкість у використанні.

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії (військові, розробка авіаційної і морської техніки, архітектура та будівельна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина) та їх головні особливості, а також відмінності між вимогами до точності показників системи у різних груп аудиторії. Також визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності компенсації, швидкодії алгоритму, надійності, адаптивності, простоті та легкості у використанні.

5.3.3 Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 5.6-5.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Вихід на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий або більш точний аналог за такою ж вартістю	Втрата клієнтів
2	Зменшення попиту	Оскільки товар не орієнтований на широкий загал, він може швидко перенасити ринок	Пошук нових клієнтів або можливостей адаптації алгоритмів під інші сфери
3	Вартість процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Подорожчання процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів, що призведе до подорожчання самого приладу	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар
5	Точність	Погана точність продукту, товар не надійний	Відмова від товару

Висновки: У таблиці 5.6 описані основні види загроз, з яких головною загрозою обрано зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих або більш точних аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, оскільки наслідками може бути знову ж таки відмова користувачів від товару.

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання прибутку, можливість подальшого розвитку та вдосконалення
2	Необхідність модифікацій та вдосконалення	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних або постійних клієнтів
3	Розробка нових допоміжних алгоритмів в якості додатків	Розширення можливостей системи	Розширення можливостей системи, збільшення появи нових клієнтів, можливість освоювати нові галузі
4	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
4	Здешевлення вартості процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Вдосконалення та спрощення процедури, що призведе до її здешевлення	Зменшення ціни на готову систему

Висновки: У таблиці 5.7 описані основні види можливостей, з яких найголовнішими обрано збільшення попиту, що призведе до зростання прибутку, можливості подальшого розвитку та вдосконалення, і, як наслідок цього, можливі будуть будь-які інші можливості, що описані у таблиці. Інші фактори відкривають потенціал для вдосконалення та розширення можливостей алгоритму, а також до зменшення ціни на вже готову систему.

5.3.4 Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. 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	Практично відсутня конкуренція у галузі	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потенційні клієнти є у всьому світі	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Товар може використовуватись у різноманітних галузях	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку
4. За характером конкурентних переваг - цінова	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Вдосконалення та спрощення процедури, що призведе до її здешевлення

Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути завжди конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою (практично відсутньою), і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу на міжнародний ринок, використання товару можливе у різноманітних сферах, а довіра до товару будується на репутації бренду.

5.3.5 Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 5.9).

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Відсутні	Поки що відсутні	Всі виробники систем орієнтації (БКВ)	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	Всі наявні на ринку гіроскопи
Висновки:	Конкуренція у галузі поки що практично відсутня	Можливості виходу на ринок є, і вони не важкі. Можуть з'явитись потенційні конкуренти	Постачальники не диктують умови ринку	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловості та медицини, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товар-замінник не є настільки точним, як запропоновані алгоритми.

Висновки: За результатами аналізу, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі поки що практично відсутня, можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Проект повинен мати такі сильні сторони: точність, високу швидкість, надійність, відповідність потрібним стандартам, щоб отримувати сертифікацію.

5.3.6 На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 5.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №5.6-5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 5.10).

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Підвищення точності БКВ є наслідком забезпечення компенсації похибок системи
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту
4	Надійність	Система працює стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках
5	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів за потребою потенційних клієнтів

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності і сертифікованості, а також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони проекту і те, як ці сильні сторони можуть бути корисними потенційному клієнту при використанні товару в порівнянні з товарами-конкурентами.

5.3.7 За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність	17							+
2	Адаптивність	20					+		
3	Швидкодія	20						+	

4	Надійність	15					+		
5	Сертифікованість	19		+					

Висновки: У порівнянні з товаром-конкурентом були визначені наступні сильні сторони, які полягають в високій точності, швидкодії та можливості адаптації роботи із іншими системами. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих.

5.3.8 Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 5.12).

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Найвища точність серед всіх існуючих аналогів 2. Наявність всіх патентів 3. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації 4. Можливість застосування у військовій сфері та медицині 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Оскільки продукт новий, його надійність до кінця не перевірена 2. Неможливість забезпечити всіх користувачів повною технічною підтримкою на початкових етапах
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Збільшення продажу; 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 3. Вдосконалення системи 4. Вихід на міжнародний ринок 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Втрата потенційних клієнтів через недостатню технічну підтримку.

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким були визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і максимальна технічна підтримка нових користувачів не є головною метою, оскільки вся увага приділяється в першу чергу точності, адаптивності до різних факторів і легкості у використанні запропонованими алгоритмами.

5.3.9 За SWOT-аналізом розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначено оптимальний термін реалізації. (табл. 5.13).

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	12 міс.
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	18 міс.
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	6 міс.

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Це пов'язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів, а виграш по часу, якщо розглядати таку альтернативу як стратегія виходу з ринку не корелює з ймовірністю отримання ресурсів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

5.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14. 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	Авіаційне будівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
2	Суднобудівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
3	Військова промисловість	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко
4	Розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки	Готові	високий	низька	просто
5	Суднобудівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
6	Архітектура та будівельна промисловість	Готові	високий	низька	просто
7	Робототехніка	Готові	високий	низька	просто
8	Медицина	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко

Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати із автомобільною промисловістю, компаніями, що займаються розробкою навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, із суднобудівною та авіаційною промисловістю.

Висновки: Проведено опис цільових груп потенційних клієнтів, визначено готовність споживачів сприйняти продукт, орієнтований попит в межах галузі, інтенсивність конкуренції і входу в сегмент. В якості цільових груп було обрано такі, що готові сприйняти товар без та з наявною сертифікацією, а також де середня і низька простота входу. Конкуренція в галузях низька. Оскільки буде проводитися робота відразу у декількох сферах, то обирається стратегія диференційованого маркетингу.

5.4.2 Формування базової стратегії розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Стратегія диференційованого маркетингу.	<ul style="list-style-type: none"> - Використання нових досягнень - Задоволення вимог користувачів - Постійне вдосконалення 	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар особливим в порівнянні з товарами-конкурентами за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливі характеристики товару. Так буде більше уваги приділятися високій точності, адаптивності та спрощенню у використанні, але менше технічній підтримці (оскільки цей фактор буде не суттєвим при виконанні трьох попередньо зазначених).

5.4.3 Вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. 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	Проект є «першопрохідцем» на ринку	Так, будуть вестися пошуки нових клієнтів, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, а також переманюватися у конкурентів, за допомогою пропонування кращого продукту.	Не буде проводитись копіювання, а навпаки буде впроваджено покращення і вдосконалення потрібних характеристик	Стратегія виклику лідера

Висновки: За стратегію конкурентної поведінки було обрано стратегію виклику лідера, яка полягає у протистоянні лідеру, завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із найпривабливіших для клієнтів. Також проект є «першопрохідцем» на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

5.4.4 На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17).

Таблиця 5.17. 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	Точність системи	Стратегія диференціації	Найвища точність.	Високоточна, стабільна.
2	Адаптивність до різноманітних умов	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивна до будь-яких обставин, універсальна
3	Надійність впродовж часу роботи	Стратегія диференціації	Якість	Надійна
4	Простота у використанні	Стратегія диференціації	Простота	Проста, легка, зрозуміла
5	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Висновки: Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточна, надійна і проста у використанні система. Такий висновок зроблено на основі аналізу головних вимог цільової аудиторії до розроблюваного товару, якими було обрано точність системи, простоту у використанні, адаптивність, а також надійність системи впродовж часу роботи і вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів. Базовою стратегією було обрано стратегію диференціації.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

5.5.1 Формування маркетингової концепції товару, яку отримає споживач (табл. 5.18).

Таблиця 5.18. 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 компенсації похибок БКВ з метою отримання максимально точної оцінки орієнтації об'єкта	Алгоритм має найвищі показники точності серед всіх можливих аналогів. Він також є адаптивним до різноманітних факторів, простим у використанні.	Максимальна точність, адаптивність, надійність, проста у використанні, підтримка споживача, можливість широкого використання.

Висновки: Як видно з табл. 5.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у максимальній точності, адаптивності, надійності, прості у використанні, підтримці споживача, можливості широкого використання. відносно товарів конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

5.5.2 Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість компенсувати похибки систем орієнтації і отримати максимально точні дані на виході. Ці алгоритми дуже легко впроваджувати в системне забезпечення систем орієнтації у вигляді спеціального коду, що робить їх простими і зрозумілими у використанні.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність компенсації	1. 0.05°	1. Тх

	2. Швидкість роботи алгоритмів	2. 250 Гц	2. Тх
	3. Надійність впродовж часу роботи	3. -	3. Тх
	4. Простота реалізації	4. Нм	4. Тл
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація для використання в медичних закладах, сертифікація IEEE.		
	Пакування: програмне забезпечення.		
	Марка: проект «Мікромеханічна курсовертикаль з алгоритмом на основі фільтра Калмана».		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: отримання спеціальної консультації щодо встановлення програмного забезпечення та його використання.		
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання:			
Захист товару проводиться шляхом патентування приладу, проведення заходів захисту програмного забезпечення.			

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після покупки. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

5.5.3 Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 5.20).

Таблиця 5.20. 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	1000-200 ум.од.	500 – 4000 ум.од.	10000-15000 ум.од.	Нижня межа: 2500 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на собівартості розробки програмного забезпечення, а також враховано унікальність даних алгоритмів. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є великі компанії.

5.5.4 Визначення оптимальної системи збуту (табл. 5.21).

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Роздрібна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача.	Канал одного рівня	Підприємства роздрібної торгівлі
2	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це роздрібна закупівля, оптова закупівля та орендування. Визначено функції збуту, які повинен виконувати постачальник товару. Визначено, через що оптимально реалізовувати збут при різній специфіці закупівельної поведінки цільових клієнтів.

5.5.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. 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	Знайти можливість швидко та зручно компенсувати похибки БКВ для отримання точної оцінки орієнтації об'єкта в умовах динамічних збурень	Інтернет, телефон, відвідування наукових форумів, конференцій, презентацій	Точність, швидкість, адаптивність, простота	Приваблення нових цільових клієнтів	Розповісти про новий підхід до компенсації існуючих похибок БКВ

Висновки: Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету, телефону та проведенні спеціальних наукових форумів і презентацій, які обрані основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення, де буде розповідатись про новий підхід до компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів та отримання з їх допомогою більш точних даних.

Висновки до розділу 5

При розробці стартап-проекту було пророблено всі етапи, необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап-проекту на ринок, для того, щоб він став успішним [37].

Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах,

таких, як авіабудування, морська справа, військова промисловість, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання, робототехніка, медицина.

Товар має досить гарні показники у порівнянні з товарами-конкурентами. Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення точності роботи системи, що в більшій мірі задовольняє користувачів, так як вимірювання та покази системи будуть максимально точними.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ним. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах.

За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренції у галузі практично не існує, проте в майбутньому можуть з'явитись потенційні конкуренти. Умови ринку не встановлюються постачальниками. Також з боку деяких потенційних клієнтів з'являються специфічні умови.

Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабих сторін проекту: наявність патентів, висока точність. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: автомобільну промисловість, компанії, що займаються розробкою навігаційного обладнання, робототехніки,

авіаційне будівництво, суднобудівництво. У якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації. Стратегію лідера – у якості стратегії конкурентної поведінки. Сформульовано власну позицію стартап-проекту, вигляді трьох ключових понять: високоточний, надійний і простий у використанні алгоритм. Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти. Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів.

Із зазначеного вище зроблено висновки, що подальша імплементація проекту є цілком доцільною.

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи було вирішено та виконано наступні задачі:

1) Проведено інформаційно-аналітичний огляд стану проблеми підвищення точності безплатформних інерціальних систем орієнтації, побудованих на базі мікромеханічних датчиків. Розглянуто можливі методи компенсації похибок таких систем. У результаті, в якості напрямку дослідження обрано алгоритм безплатформної курсовертикалі з використанням оптимального фільтру Калмана.

2) Проведено аналіз існуючих реалізацій алгоритму ОФК в безплатформних системах орієнтації та навігації. Встановлено суттєвий недолік існуючих алгоритмів, що полягає в високій складності виконуваних обрахунків та, відповідно, високих обчислювальних вимогах до процесора, на борту якого проводяться розрахунки.

В результаті порівняння загальноприйнятих рівнянь орієнтації, що лежать в основі будь-якого алгоритму системи орієнтації, було встановлено, що найоптимальнішим варіантом є використання рівнянь орієнтації з параметрами Родриго-Гамільтона.

Для розробки алгоритму ОФК було виведено рівняння похибок системи у кватерніонній формі та отримано модель вимірювання БКВ.

3) Для забезпечення лінійного зв'язку вектора стану та вектора вимірювання, під час складання рівняння вимірювання, було розглянуто кути похибок орієнтації БКВ. Використовуючи отримане рівняння похибок та відповідний вектор стану системи, було отримано спрощений вектор вимірювання БКВ.

Проведено перевірку спостережуваності системи, що підтверджує можливість оцінки усіх шістьох компонентів вектору стану (похибок) з використанням запропонованого вектора вимірювання.

Виконано оцінку обчислювальних витрат одного кроку алгоритму ОФК, що підтверджує ефективність використання запропонованого алгоритму (обчислювальні вимоги знижено майже в 4 рази).

4) Розглянуто можливість застосування вимірювань БКВ для оцінки параметрів морської хвилі в системах орієнтації та навігації на морських об'єктах, системах моніторингу та прогнозування екстремальних погодних умов.

Розроблено алгоритм оцінки наступних параметрів морської хвилі: напрямок, період, еліптичність, енергія та спектральна щільність потужності хвилі на основі обрахованих кутів орієнтації об'єкта та сигналів акселерометрів безплатформної системи орієнтації.

5) Проведено напівнатурне моделювання розробленого алгоритму роботи БКВ на основі фільтра Калмана з використанням реальних сигналів безплатформної курсовертикалі AHRS-10 компанії Inertial Labs, що підтвердило коректність та відповідну точність запропонованого алгоритму.

Розроблено стенд-імітатор поведінки об'єкта на морській хвилі. Проведено натурні випробування алгоритму оцінки параметрів морської хвилі з використанням MRU-E. Отримані результати підтверджують коректність та ефективність розробленого алгоритму.

6) Результати дослідження мають практичне впровадження. Алгоритм оцінки параметрів морської хвилі з використанням вимірювань безплатформної курсовертикалі використовується у програмному забезпеченні морських курсовертикалей типу MRU в ТОВ «Гіротех» (м. Київ). Розроблений стенд-імітатор руху об'єкта на морській хвилі використовується у процедурі тестування MRU.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мелешко В. В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: [Учебное пособие] / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград: Полимед-Сервис, 2011. – 172с.
2. Ривкин С. С. Статистическая оптимизация навигационных систем / С. С. Ривкин, Р. И. Ивановский, А. В. Костров – Л.: «Судостроение», 1976. – 280 с.
3. Sabatini A. M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing / A. M. Sabatini. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006. – №53. – pp. 1346–1356.
4. Sabatini A. M. Kalman-filter-based orientation determination using inertial/magnetic sensors: observability analysis and performance evaluation / A. M. Sabatini. // Sensors (Basel). – 2011. – №11. – pp. 9182–9206.
5. Li W. Effective Adaptive Kalman Filter for MEMS-IMU/Magnetometers Integrated Attitude and Heading Reference Systems / W. Li, J. Wang // The Journal of Navigation. – 2013. – №66. – pp. 99–113.
6. Zhong-yu G. Quaternion-Based Kalman Filter for Micro-machined Strapdown Attitude Heading Reference System / G. Zhong-yu, N. Xiao-ji, G. Mei-feng. // Chinese Journal of aeronautics. – 2002. – vol. 15. – pp. 171–175.
7. A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed Wing UAV / [M. Euston, P. Coote, R. Mahony etc.]. // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2008. – pp. 340–345.
8. Ryzhkov L. Complementary Filter Design for Attitude Determination / L. Ryzhkov. // IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – 2018. – pp. 214–217.
9. Fast Complementary Filter for Attitude Estimation Using Low-Cost MARG Sensors / [J. Wu, Z. Zhou, J. Chen etc.]. // IEEE Sensors Journal. – 2016. – №. 16. – pp. 6997-7007.

10. Yun X. A Simplified Quaternion-Based Algorithm for Orientation Estimation from Earth Gravity and Magnetic Field Measurements / X. Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – №. 57. – pp. 638–650.
11. Одинцов А. А. Теория и расчет гироскопических приборов / А. А. Одинцов. – К.: Вища школа, 1985. – 392 с.
12. Клішта А. В. Забезпечення функціонування гіромагнітної курсовертикалі при магнітних збуреннях / А. В. Клішта, О. І. Нестеренко. // Вісник НТУУ “КПІ”. – 2014. – №47. – С. 5–12.
13. Yadav N. Accurate Orientation Estimation Using AHRS under Conditions of Magnetic Distortion / N. Yadav, C. Bleakley. // Sensors. – 2014. – №14. – pp. 8–24.
14. Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation / D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. Baten, P. H. Veltink. // IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering. – 2005. – №13. – pp. 395–405.
15. Vicon 370 Optical tracking system [Online] // Vicon brochure. – 2015. – Available: <https://www.vicon.com/file/vicon/viconbrochure2015-14884.pdf>.
16. A Study of Low-cost Attitude and Heading Reference System under High Magnetic Interference / F. Wu, Y. Fu, Y. Liang, X. Ji. // IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). – 2016. – pp. 916–923.
17. Lee J. K. A Sequential Orientation Kalman Filter for AHRS Limiting Effects of Magnetic Disturbance to Heading Estimation / J. K. Lee, M. J. Choi. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2017. – №12. – pp. 1675–1682.
18. Літош А. М. Методи розділення каналів безплатформної курсовертикалі / А. М. Літош, С. Л. Лакоза // XI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». – 2018. – с. 34-37.
19. Лакоза С. Л. Побудова курсовертикалі з розділенням каналів корекції. Частина 1: Теоретичні основи розділення каналів корекції / С. Л. Лакоза,

- В. В. Мелешко // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2013. – вип. 46. – с. 5-13.
20. Лакоза С. Л. Побудова курсовертикалі з розділенням каналів корекції. Частина 2: Алгоритми корекції / С. Л. Лакоза, В. В. Мелешко // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2014. – вип. 48. – с. 5-13.
 21. Смирнов Е. Л., Яловенко А. В., Якушенков А. А. Технические средства судовождения. — М.: Транспорт, 1988. — 376 с.
 22. Attitude and heading reference system with acceleration compensation / E. M. Hemerly, B. C. Maciel, A. P. Milhan, V. R. Schad. // Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal. – 2012. – №2. – pp. 87–93.
 23. Performance of automotive-grade MEMS sensors in low cost AHRS for general aviation / L. Sherry, C. Brown, B. Motazed, D. Vos. // IEEE/DASC, Digital Avionics Systems Conference, USA. – 2003. – №12. – pp. 1–5.
 24. A low-cost attitude heading reference system by combination of GPS and magnetometers and MEMS inertial sensors for mobile applications / [Y. Li, A. Dempster, B. Li, etc.] // Journal of Global Positioning Systems. – 2006. – №5. – pp. 88-95.
 25. A low-cost air data attitude heading reference system for the tourism airplane applications / [J. F. G. Castellanos, S. Lesecq, N. Marchand, etc.] // 4th IEEE Sensors. – 2005. – pp. 1388–1391.
 26. Pourtakdoust S. H. An adaptive unscented Kalman filter for quaternion-based orientation estimation in low-cost AHRS / S. H. Pourtakdoust, H. Ghanbarpour // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 2007. – №79. – pp. 485–493.
 27. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. — СПб: ГНЦ РФ — ЦНИИ “Электроприбор”, 2001. — 390 с.
 28. Нестеренко О. І. Компенсація похибок курсовертикалі при хитавищі об’єкта / О. І. Нестеренко, О. В. Ігнатович. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2013. – №2. – С. 133–139.

29. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – Москва: Наука, 1982. – 200 с.
30. Mendel J. Computational requirements for a discrete Kalman filter / Jerry Mendel. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1971. – vol. 16. – pp. 748–758.
31. Bilous Y. I. Simplification of the measurement model in algorithm of the strapdown attitude and heading reference system based on the quaternion Kalman filter / Y. I. Bilous, O. I. Nesterenko. // KPI Science News. – 2019. – №1. – pp. 52–58.
32. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Перевод с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 296с.
33. Longuet-Higgins M. S., Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy / M. S. Longuet-Higgins, D. E. Cartwright, N. D. Smith. // Ocean wave spectra, Prentice-Hall. – 1963. – pp. 111–136.
34. Kuik A. J. A method for the Routine Analysis of Pitch-and-Roll Buoy Wave Data / A. J. Kuik, G. Ph. Vledder, L. H. Holthuijsen. // Journal of Physical Oceanography. – 1988. – vol. 18. – no 7. – pp. 1020–1034.
35. Attitude Heading Reference System (AHRS-10) [Электронный ресурс]: Datasheet / Inertial Labs. – Режим доступа: https://inertiallabs.com/static/pdf/AHRS-10B_10P-Datasheet.rev4.2_March_2019.pdf
36. Motion Reference Unit (MRU) [Электронный ресурс]: Datasheet / Inertial Labs. – Режим доступа: https://inertiallabs.com/static/pdf/MRU_Datasheet.rev1.6_April_2019.pdf
37. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТОК А

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

УКРАЇНА

**Товариство з обмеженою відповідальністю
«ГІРОТЕХ»**

юридична адреса: м. Київ 04071, вул. Шекавицька, 37/48, офіс 1
фактична адреса: м. Київ 03680, вул. Казимира Малевича, 86г. офіс 2, тел. 38(044) 500-13-21.
р/р 26006011045141 в ПАТ «Укрсоцбанк», м. Київ, МФО 300023, ЄДРПОУ 37333629

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «ГІРОТЕХ»

Ю.В.Чех



АКТ

Впровадження результатів наукових досліджень

Ми, що нижче підписалися, начальник відділу програмного забезпечення ТОВ «Гіротех» Тертичний Віктор Васильович, провідний спеціаліст Золотарьов Євген Олександрович, склали цей акт про те, що наступні результати наукових досліджень Білоуса Євгена Івановича, отримані в магістерській дисертації «Мікромеханічна курсовертикаль з алгоритмом роботи на основі фільтра Калмана», використані у розробках ТОВ «Гіротех»:

- алгоритм оцінки параметрів морської хвилі використаний у програмному забезпеченні морських курсовертикалей типу MRU;
- розроблений Білоусом Є.І. стенд імітування руху морського буя в умовах хвилювання використовується у процедурі тестування MRU.

Начальник відділу програмного
забезпечення ТОВ «Гіротех»

В.В.Тертичний

Провідний спеціаліст

Є.О.Золотарьов

ДОДАТОК Б

Лістинг програми напівнатурного моделювання алгоритму БКВ на основі ОФК

Керуюча програма:

```

%%
clc; clear; close all;
global d2r r2d
d2r = pi/180; r2d = 180/pi;
pname = '';
test = 1;

if test == 1
    fname = 'C1710245-2019-04-22-15-40-26.txt';
elseif test == 2
    fname = 'C1710226-2019-04-22-16-37-20.txt';
end

FileName = strcat(pname,fname);
[gyro,acc,mag,K_ref,P_ref,R_ref,Data_rate,Acc_0, Mag_0, Gyro_0] =
read_sensors_data(FileName);

Nt = length(gyro);

%% СКО шуму
std_a = 0.03; %Акселерометри
std_m = 0.5; %Магнітометри
std_g = 2e-1; %ДКШ
std_d = 1e-4; %Дрейф

STD_arr=[std_a std_m std_g std_d];

%% Иніціалізація масивів
C_gb_0=zeros(3,3);

Heading = zeros(1,Nt);
Pith     = zeros(1,Nt);
Roll     = zeros(1,Nt);

%% Сигнали датчиків з початкової виставки
Ax_0 = Acc_0(1);
Ay_0 = Acc_0(2);
Az_0 = Acc_0(3);
g = norm(Acc_0);

Hx_0 = Mag_0(1);
Hy_0 = Mag_0(2);
Hz_0 = Mag_0(3);

```

```

%% Початкова виставка БКВ
C_gb_0(3,1) = Ax_0/g;
C_gb_0(3,2) = Ay_0/g;
C_gb_0(3,3) = Az_0/g;

C_gb_1(1,1) = Hy_0*C_gb_0(3,3) - Hz_0*C_gb_0(3,2);
C_gb_1(1,2) = Hz_0*C_gb_0(3,1) - Hx_0*C_gb_0(3,3);
C_gb_1(1,3) = Hx_0*C_gb_0(3,2) - Hy_0*C_gb_0(3,1);

C_gb_0(1,1) = C_gb_1(1,1)/norm(C_gb_1);
C_gb_0(1,2) = C_gb_1(1,2)/norm(C_gb_1);
C_gb_0(1,3) = C_gb_1(1,3)/norm(C_gb_1);

C_gb_0(2,1) = C_gb_0(3,2)*C_gb_0(1,3) - C_gb_0(3,3)*C_gb_0(1,2);
C_gb_0(2,2) = C_gb_0(3,3)*C_gb_0(1,1) - C_gb_0(3,1)*C_gb_0(1,3);
C_gb_0(2,3) = C_gb_0(3,1)*C_gb_0(1,2) - C_gb_0(3,2)*C_gb_0(1,1);

% Початкові кути орієнтації
[K_0, P_0, R_0] = dcm2euler(C_gb_0);

% Початковий кватерніон орієнтації
L_0 = dcm2quat(C_gb_0);
Lk0 = L_0(1); Lk1 = L_0(2); Lk2 = L_0(3); Lk3 = L_0(4);

% Компоненти магнітного поля Землі
Mag_g = C_gb_0*Mag_0';
H = sqrt(Mag_g(1)^2+Mag_g(2)^2);
Z = -Mag_g(3);

%% Алгоритм ОФК
L_fk = kalman(Gyro_0,gyro, acc, mag, STD_arr, L_0, g, H, Z,
Data_rate);

%% Визначення кутів орієнтації
for i = 1:Nt
    C_gb_fk = quat2dcm (L_fk(:,i));
    [K_fk, P_fk, R_fk] = dcm2euler(C_gb_fk);

    Heading(i) = K_fk*r2d;
    Pith(i)     = P_fk*r2d;
    Roll(i)     = R_fk*r2d;
end

%% Побудова графіків
scrsz = get(0,'ScreenSize');
line_width = 2;
fig_size = [70 70 scrsz(3)/2.2 scrsz(4)/1.8];
legend_arr = [{'Курс \psi, \circ'} {'Тангаж \theta, \circ'} {'Крен, \gamma, \circ'}];
t = (0:1:Nt-1)/Data_rate;
Angles_AHRS = [K_ref; P_ref; R_ref];
Angles_FK = [Heading; Pith; Roll];

```

```

FK_err=Angles_FK-Angles_AHRS;

for i = 1:3
    std_FK(i)=std(Angles_FK(i,:))
    std_AHRS(i)=std(Angles_AHRS(i,:))
    mean_FK(i)=mean(Angles_FK(i,:))
    mean_AHRS(i)=mean(Angles_AHRS(i,:))

    std_err(i)=std(FK_err(i,:))
    mean_err(i)=mean(FK_err(i,:))
    min_err(i)=min(FK_err(i,:))
    max_err(i)=max(FK_err(i,:))
    amp_arr(i)=(max_err(i)-min_err(i))/2
end

figure('Position',fig_size);
for f = 1:3
    subplot(3,1,f)
    plot(t,Angles_FK(f,:), 'linewidth',line_width);grid on;grid minor;
hold on;
    plot(t,Angles_AHRS(f,:), '--', 'linewidth',line_width);grid on;
    ylabel(legend_arr{f});
    if f == 3; xlabel('Час, c'); end
    if f == 1; title('Кути орієнтації БКВ (ОФК) та AHRS-10'); end
    legend('БКВ (ОФК)', 'AHRS-10');
    set(gca, 'FontSize',14)
end

figure('Position',fig_size);
for f = 1:3
    subplot(3,1,f)
    plot(t,FK_err(f,:), 'linewidth',line_width);grid on;grid minor;hold
on;
    ylabel(legend_arr{f});
    if f == 3; xlabel('Час, c'); end
    if f == 1; title('Похибки БКВ (ОФК)'); end
    set(gca, 'FontSize',14)
end

legend_arr = [{'\omega_x', '\circ/c'} {'\omega_y', '\circ/c'} {'\omega_z',
'\circ/c'}];

figure('Position',fig_size);
for f = 1:3
    subplot(3,1,f)
    plot(t,gyro(f,:)*r2d, 'linewidth',line_width);grid on;grid minor;
    ylabel(legend_arr{f});
    if f == 3; xlabel('Час, c'); end
    if f == 1; title('Сигнали ДКШ AHRS-10'); end
    set(gca, 'FontSize',14)
end

```

```

legend_arr = [{'a_x', 'м/с^2'} {'a_y', 'м/с^2'} {'a_z', 'м/с^2'}];

figure('Position',fig_size);
for f = 1:3
    subplot(3,1,f)
    plot(t,acc(f,:), 'linewidth',line_width);grid on;grid minor;
    ylabel(legend_arr{f});
    if f == 3; xlabel('Час, с'); end
    if f == 1; title('Сигнали акселерометрів AHRS-10'); end
    set(gca,'FontSize',14)
end

legend_arr = [{'m_x', 'нТ'} {'m_y', 'нТ'} {'m_z', 'нТ'}];

figure('Position',fig_size);
for f = 1:3
    subplot(3,1,f)
    plot(t,mag(f,:), 'linewidth',line_width);grid on;grid minor;
    ylabel(legend_arr{f});
    if f == 3; xlabel('Час, с'); end
    if f == 1; title('Сигнали магнітометрів AHRS-10'); end
    set(gca,'FontSize',14)
end

```

Функція визначення кутів орієнтації через МНК :

```

function [Heading, Pitch, Roll]=dcm2euler(C_gb_0)
%% Визначення кутів орієнтації через МНК
if abs(C_gb_0(2,2)) >= abs(C_gb_0(1,2))
    K = atan(C_gb_0(1,2)/C_gb_0(2,2));
    Heading = K;
    if (C_gb_0(2,2) >= 0) && (C_gb_0(1,2) < 0) % 270...360 град.
        Heading = K + 2*pi;
    end
    if (C_gb_0(2,2) < 0) % 90...180 град.
        Heading = K + pi;
    end
else
    K = -atan(C_gb_0(2,2)/C_gb_0(1,2))+pi/2;
    Heading = K;
    if (C_gb_0(1,2) < 0)
        Heading = K + pi;
    end
end

if abs(C_gb_0(3,2))>1
    C_gb_0(3,2) = sign(C_gb_0(3,2));
end

Pitch = asin(C_gb_0(3,2));

if (abs(C_gb_0(3,3)) >= abs(C_gb_0(3,1)))

```

```

G = -atan(C_gb_0(3,1)/C_gb_0(3,3));
Roll = G;
if (C_gb_0(3,3) < 0) && (C_gb_0(3,1) < 0)           % 90...180 град.
    Roll = G + pi;
end
if (C_gb_0(3,3) < 0) && (C_gb_0(3,1) >= 0)         % 180...270 град.
    Roll = G - pi;
end
else
    G = atan(C_gb_0(3,3)/C_gb_0(3,1))+pi/2;
    Roll = G;
    if C_gb_0(3,1) >= 0
        Roll = G - pi;
    end
end
end

```

Функція визначення кватерніону орієнтації через МНК :

```

function L = dcm2quat(C_gb)

%% Визначення елементів кватерніону орієнтації через МНК
L(1) = 1/2*sqrt(1+C_gb(1,1)+C_gb(2,2)+C_gb(3,3));
L(2) = 1/2*sqrt(1+C_gb(1,1)-C_gb(2,2)-C_gb(3,3))*sign(-
C_gb(2,3)+C_gb(3,2));
L(3) = 1/2*sqrt(1-C_gb(1,1)+C_gb(2,2)-C_gb(3,3))*sign(-
C_gb(3,1)+C_gb(1,3));
L(4) = 1/2*sqrt(1-C_gb(1,1)-C_gb(2,2)+C_gb(3,3))*sign(-
C_gb(1,2)+C_gb(2,1));

L = L';

```

Функція визначення МНК через елементи кватерніону орієнтації :

```

function [C_gb] = quat2dcm(L)

%% Визначення МНК через елементи кватерніону орієнтації
Lk = L';
C_gb = [Lk(1)^2+Lk(2)^2-Lk(3)^2-Lk(4)^2 ...
        2*(-Lk(1)*Lk(4)+Lk(2)*Lk(3)) ...
        2*(Lk(2)*Lk(4)+Lk(1)*Lk(3)); ...

        2*(Lk(1)*Lk(4)+Lk(2)*Lk(3)) ...
        Lk(1)^2-Lk(2)^2+Lk(3)^2-Lk(4)^2 ...
        2*(-Lk(1)*Lk(2)+Lk(3)*Lk(4)); ...

        2*(Lk(2)*Lk(4)-Lk(1)*Lk(3)) ...
        2*(Lk(1)*Lk(2)+Lk(3)*Lk(4)) ...
        Lk(1)^2-Lk(2)^2-Lk(3)^2+Lk(4)^2];
end

```


Функція алгоритму ОФК

```
function [L_fk] = kalman(Gyro_0,gyro, acc, mag, STD_arr, L_0, g, H,
Z, Data_rate)

global d2r r2d

dt = 1/Data_rate;
Nt = length(gyro);

wx = gyro(1,:);
wy = gyro(2,:); % Сигнали ДКШ
wz = gyro(3,:);
ax = acc(1,:);
ay = acc(2,:); % Сигнали акселерометрів
az = acc(3,:);
mx = mag(1,:);
my = mag(2,:); % Сигнали магнітомерів
mz = mag(3,:);

%Ініціалізація масиву кватерніонів
L_fk = zeros(4,Nt);

% Початкові значення кватерніону
q_ev = L_0;

% Початкові значення помилки ДКШ
q_err_prev_0 = [0; 0; 0];
B_ev_next = [0; 0; 0];
B_ev_next = Gyro_0;

% Початкові значення матриці P
P_f = zeros(6,6);
P_prev = P_f;

std_a = STD_arr(1);
std_m = STD_arr(2);
std_g = STD_arr(3);
std_d = STD_arr(4);

R_f = eye(3,3).*[std_a^2 std_a^2 std_m^2];
R_d = R_f*dt;
Q_f = [eye(3,3)*std_g*d2r zeros(3,3);
       zeros(3,3) eye(3,3)*std_d*d2r]*dt^2;
Q_d = Q_f*dt;

for i=1:Nt

    %%%%%%%%% Врахування оцінки похибки ДКШ %%%%%%%%%
    wx(i) = wx(i)-B_ev_next(1);
    wy(i) = wy(i)-B_ev_next(2);
    wz(i) = wz(i)-B_ev_next(3);
```

```

    omeg = [ 0      wz(i) -wy(i);
            -wz(i)  0      wx(i);
            wy(i) -wx(i)  0 ];

    omeg_ev = [ 0 -wx(i) -wy(i) -wz(i);
                wx(i) 0 wz(i) -wy(i);
                wy(i) -wz(i) 0 wx(i);
                wz(i) wy(i) -wx(i) 0];

    q_f = q_ev;
    C_gb = quat2dcm(q_f);

    %%%%% Інтегрування кватерніонного рівняння орієнтації %%%%%
    q_ev_t = q_f + (omeg_ev*q_f/2)*dt;

    %%%%%%%%%%%%% Формування вектора вимірювань %%%%%%%%%%%%%
    m_g = [0; H; -Z];

    A_g = C_gb*[ax(i);ay(i);az(i)];
    M_g = C_gb*[mx(i);my(i);mz(i)];

    Yk = [-A_g(2)/g; A_g(1)/g; -M_g(1)/H];

    %%%%%%%%%%%%% Формування матриці вимірювань %%%%%%%%%%%%%
    D1_tk = [ 2      0      0 ;
              0      2      0 ;
              0      2*(Z/H)  2];

    D_tk = [D1_tk zeros(3,3)];

    F = [ -omeg      -eye(3,3)/2;
          zeros(3,3) zeros(3,3)];

    EF = eye(6,6)+F*dt;

    P_next = EF*P_prev*EF'+Q_d;
    K = P_next*D_tk'/(D_tk*P_next*D_tk'+R_d);
    P_prev = (eye(6,6)-K*D_tk)*P_next;

    X = K*Yk;
    q_err_prev = X(1:3);
    d_B_prev = X(4:6);
    q_ev_prev = quatmultiply(q_ev_t',[1 ;q_err_prev]');
    q_ev = q_ev_prev';
    B_ev_prev = B_ev_next+d_B_prev;
    B_ev_next = B_ev_prev;

    q_ev = q_ev/norm(q_ev);

    L_fk(:,i) = q_ev;

end
end

```