

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет інформаційних електронних систем  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему:  
**«MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Клювак Клювак В.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., проф. каф. ІРТС

Осадчук Осадчук В.С.  
(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

Опонент: к.т.н., ст. викл. каф. ІКСТ

Макогон Макогон В.І.  
(прізвище та ініціали)

«21» 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

Осадчук д.т.н., проф. Осадчук О.В.  
(прізвище та ініціали)

«22» 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
Освітньо-професійна програма Радіотехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС  
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2022 року

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Клюваку Владиславу Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем»

керівник роботи Осадчук В.С., професор каф. ІРТС, д. т. н. проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 09.2022 року № 203

2. Строк подання студентом роботи 19.12.2022р.

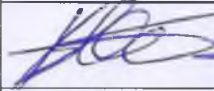
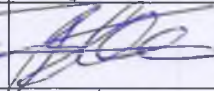
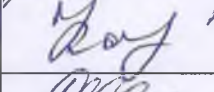
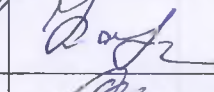


3. Вихідні дані до роботи: дослідити новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для акселерометра та гіроскопа (SCF) та його швидшу версію (FSCF); дослідити методи підвищення точності кута орієнтації SINS; розглянути схмотехнічне рішення синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа; здійснити метрологічну оцінку похибок розглянутих методів корекції кута орієнтації SINS.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Аналіз сучасного стану MEMS пристроїв. Розробка швидкого фільтру AHRS для комбінації акселерометра, гіроскопа та магнітометра з окремими корекціями сенсора. Компенсація кута нахилу для методу синхронного збору даних на основі датчика MEMS. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Основний принцип роботи конденсаторних акселерометрів. Основний принцип роботи акселерометрів на п'єзоелементах. Двохосний термальний акселерометр. Схематичне зображення ємнісного MEMS акселерометра. Блок-схема фільтра комбінації датчика магнітної кутової швидкості та гравітації (MARG) Маджвіка (ліворуч) і запропонованого розділеного коригувального фільтра (SCF) (праворуч). Блок-схема розробленої системи. Часова діаграма рівноточного методу вимірювання частоти.



## 6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В.С.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

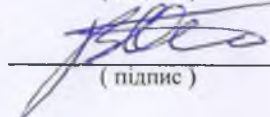
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022-07.09.2022	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022-27.09.2022	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2022-10.10.2022	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2022-04.11.2022	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-13.11.2022	
7.	Економічна частина.	14.11.2022-20.11.2022	
8.	Охорона праці (ОП).	21.11.2022-25.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2022-01.12.2022	
10.	Нормоконтроль.	02.12.2022-09.12.2022	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2022-20.12.2022	
12.	Захист МКР ЕК.	21.12.2022-23.12.2022	

Студент

  
( підпис )

Клювак В.М.

Керівник роботи

  
( підпис )

Осадчук В.С.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Клювак В.М. MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2022. 130с.

На укр. мові. Бібліогр.: 67 назв; рис.: 65; табл. 22.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням схмотехнічної та програмної реалізації MEMS акселерометрів та гіроскопів для робототехнічних систем. На підставі проведеного аналізу літературних джерел зроблені висновки, що найбільш розпоширенішими з MEMS-сенсорів є датчики руху. Вони останнім часом дуже широко застосовуються це телефони, комунікатори, ігрові приставки, фотокамери та ноутбуки все частіше і частіше постачаються акселерометрами (датчиками прискорення) та гіроскопами (датчиками повороту), тому цим пристроям присвячена дана магістерська кваліфікаційна робота.

У другому розділі запропоновано новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для магнітометра та акселерометра (SCF) та його швидшу версію (FSCF). Обидва фільтри мають нижчу обчислювальну вартість, ніж інші добре відомі методи в цій галузі. Хоча обидва фільтри мають прості структури, було продемонстровано, що вони більш точні, ніж їхні конкуренти. Найбільш помітне покращення спостерігалось в сценарії з повільними обертаннями (77% середня абсолютна похибка другого найкращого фільтра), але воно покращує динамічне прискорення, а також швидкі обертання.

У третьому розділі, щоб підвищити точність кута орієнтації SINS, була запропонована схема синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа. У процесі зміни прискорення цей метод був сприятливим для корекції та компенсації кута орієнтації. Крім того, щоб покращити продуктивність QVBA в SINS, запропоновано вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності, який зробив точність вибірки QVBA точнішою.

У четвертому розділі описано рекомендації щодо охорони праці та безпеки при роботі з даним пристроєм.

У п'ятому розділі проведено розрахунок кошторису витрат на виробництво пристрою та ефективність вкладених інвестицій.

Ключові слова: MEMS акселерометр, MEMS гіроскоп, фільтрація сигналів, алгоритм роботи пристрою.

## ABSTRACT

Klyuvak V.M. MEMS accelerometers and gyroscopes for robotic systems. Master's qualification thesis on specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering.–Vinnytsia: VNTU, 2022. 130p.

In Ukrainian language. Bibliography: 67 titles; Fig.: 65; table 22.

In the master's qualification work, an analysis of publications devoted to theoretical and experimental researches of schematic and software implementation of MEMS accelerometers and gyroscopes for robotic systems was carried out. Based on the analysis of literary sources, it was concluded that the most common of MEMS sensors are motion sensors. Recently, they are very widely used: phones, communicators, game consoles, cameras and laptops are more and more often supplied with accelerometers (acceleration sensors) and gyroscopes (rotation sensors), so this master's thesis is dedicated to these devices.

In the second section, a new AHRS predictor-corrector filter using separate correction steps for magnetometer and accelerometer (SCF) and its faster version (FSCF) is proposed. Both filters have a lower computational cost than other well-known methods in the field. Although both filters have simple structures, they have been shown to be more accurate than their competitors. The most noticeable improvement was seen in the slow rotation scenario (77% mean absolute error of the second best filter), but it improves dynamic acceleration as well as fast rotations.

In the third section, to improve the orientation angle accuracy of SINS, a synchronous data acquisition scheme was proposed to perform accelerometer and gyroscope synchronization. In the process of changing the acceleration, this method was favorable for the correction and compensation of the orientation angle. In addition, to improve the performance of QVBA in SINS, an improved equal-precision frequency measurement method was proposed, which made the sampling accuracy of QVBA more accurate.

The fourth chapter describes recommendations for occupational health and safety when working with this device.

In the fifth chapter, the calculation of the cost estimate for the production of the device and the effectiveness of the investments made is carried out.

Keywords: MEMS accelerometer, MEMS gyroscope, signal filtering, device operation algorithm.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ MEMS ПРИСТРОЇВ</b> .....	12
1.1 MEMS: мікроелектромеханічні системи .....	11
1.2 MEMS мікрофони та сенсори тиску .....	17
1.3 MEMS акселерометри .....	21
1.4 MEMS гіроскопи .....	24
1.5 MEMS магнітометр .....	26
1.6 MEMS актуатори .....	28
1.7 Висновки до розділу.....	36
<b>2 РОЗРОБКА ШВИДКОГО ФІЛЬТРУ АНРС ДЛЯ КОМБІНАЦІЇ АКСЕЛЕРОМЕТРА, ГІРОСКОПА ТА МАГНІТОМЕТРА З ОКРЕМИМИ КОРЕКЦІЯМИ СЕНСОРА</b> .....	37
2.1 Математична модель операції обертання акселерометра та гіроскопа .....	40
2.2 Експериментальні дослідження .....	48
2.3 Висновки до розділу.....	58
<b>3 КОМПЕНСАЦІЯ КУТА НАХИЛУ ДЛЯ МЕТОДУ СИНХРОННОГО ЗБОРУ ДАНИХ НА ОСНОВІ ДАТЧИКА MEMS</b> .....	60
3.1 Підгрунття для створення методу та системи компенсації кута нахилу для роботизованих систем.....	60
3.2 Побудова системи компенсації кута нахилу.....	63
3.3 Експериментальні дослідження .....	72
3.4 Висновки до розділу .....	82
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	83
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	83
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	86
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	97
4.4 Висновки до розділу.....	98
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	99
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання робіт .....	99
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	101
5.3 НС внаслідок аварій з викидом небезпечних хімічних речовин .....	111
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	113
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	114

Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	120
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	129

## ВСТУП

### Актуальність теми

З розвитком технології мікроелектромеханічних систем (MEMS) кварцові вібраційні променеві акселерометри (QVBA), новий тип інерційного датчика MEMS із повним цифровим імпульсним виходом, привертають все більшу увагу в малих літаках, роботах, навігаційних системах, системи доповненої реальності тощо завдяки перевагам високої точності, малого розміру та низької вартості. У безплатформній інерціальній навігаційній системі (SINS) QVBA в основному використовуються для вимірювання лінійного прискорення тіла. Через хороші статичні характеристики значення прискорення можна точно виміряти в статичному стані. Однак під час польоту вони чутливі до температури шум через погані динамічні характеристики. Щоб вирішити проблему точності вимірювання акселерометром, у багатьох високоточних інерціальних навігаційних системах використовується безплатформний механізм із інтеграцією акселерометра та гіроскопа. У цих безрамкових інерціальних навігаційних системах для вимірювання кутової швидкості обертання використовується гіроскоп із хорошими характеристиками відстеження та хорошими характеристиками динамічного відгуку, що компенсує недолік акселерометра. Потім, об'єднавши ці два види даних, можна отримати високоточний кут огляду.

Однак ці безрамні механізми створюють нові проблеми щодо того, як інтегрувати дані акселерометра та гіроскопа для досягнення високої точності орієнтації. Багато найсучасніших досліджень вирішують цю проблему з точки зору оптимізації алгоритмів об'єднання даних. Нелінійні додаткові фільтри на основі кватерніонів для оцінки положення безпілотного літального апарату (БПЛА) за результатами вимірювань від недорогого IMU з тим, що фільтр був доповнений моделлю першого порядку динаміки автомобіля для компенсації зовнішнього доцентрового прискорення. У застосуваннях БПЛА використання додаткових фільтрів часто надають перевагу EKF, оскільки EKF може бути складним для реалізації, а збіжність відбувається повільніше через час, необхідний для ітерацій лінійної регресії.

Актуальність теми полягає у створенні простого та високоефективного методу фільтрації та корекції інформативних параметрів отриманих із MEMS акселерометрів та гіроскопів.

### Мета і задачі дослідження

*Метою роботи* є дослідження MEMS акселерометрів та гіроскопів для робототехнічних систем.



*Об'єктом дослідження* є фільтр AHRS предиктор-коректор MEMS акселерометрів та гіроскопів, що використовує окремі кроки корекції для акселерометра та гіроскопа (SCF) та його швидшу версію (FSCF), а також підвищення точності кута орієнтації SINS.

*Предметом дослідження* – фільтр AHRS предиктор-коректор MEMS акселерометрів та гіроскопів, а також схмотехнічне та програмне підвищення точності кута орієнтації SINS.

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються такі *задачі*:

- проаналізувати існуючі публікації, присвячені теоретичним і експериментальним дослідженням схмотехнічної та програмної реалізації MEMS акселерометрів та гіроскопів для робототехнічних систем та обґрунтувати переваги пристроїв, які розробляються по відношенню до існуючих;
- дослідити новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для акселерометра та гіроскопа (SCF) та його швидшу версію (FSCF);
- дослідити методи підвищення точності кута орієнтації SINS;
- розглянути схемо технічне рішення синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа.
- покращити продуктивність QVBA в SINS за рахунок вдосконалення методу вимірювання частоти рівної точності вибірки QVBA.
- здійснити метрологічну оцінку похибок розглянутих методів корекції кута орієнтації SINS.

*Методи дослідження* ґрунтуються на використанні:

основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей фільтрів AHRS предиктор-коректор MEMS акселерометрів та гіроскопів, а також схмотехнічного та програмного підвищення точності кута орієнтації SINS; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення основних параметрів фільтрів та систем корекції кута; теорії ймовірності для оцінки похибок вимірювання.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

*Наукова новизна* роботи полягає в тому, що удосконалено новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для акселерометра та гіроскопа (SCF) та його швидку версію (FSCF). Обидва

фільтри мають нижчу обчислювальну вартість, ніж інші добре відомі методи в цій галузі. Найбільш помітне покращення спостерігалось в сценарії з повільними обертаннями (77% середня абсолютна похибка другого найкращого фільтра), але воно покращує динамічне прискорення, а також швидкі обертання.

Підвищено точність кута орієнтації SINS, на основі схеми синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа. У процесі зміни прискорення цей метод був сприятливим для корекції та компенсації кута орієнтації. Крім того, щоб покращити продуктивність QVBA в SINS, запропоновано вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності, який зробив точність вибірки QVBA точнішою.

### **Практичне значення одержаних результатів**

*Практична цінність роботи* полягає в тому, що:

Розглянуті фільтри виявилися більш точними, ніж будь-які з їх конкурентів у всіх тестах. Зокрема, середня абсолютна похибка розглянутого фільтра становила 77% від другого найкращого фільтра (повільне обертання). Найбільшою перевагою розглянутого фільтра є його точність для більш повільних обертів і динамічних прискорень. Тим не менш, покращення для швидшого обертання також є значним.

На основі експериментальних досліджень та математичного моделювання досліджено діапазон розподілу похибки кута орієнтації у разі синхронізації та несинхронізації. Статистичні результати показують, що максимальна похибка кута тангажу становить  $4,69^\circ$  у разі синхронізації. Однак у разі несинхронізації максимальна похибка кута тангажу становить  $6,17^\circ$ . Завдяки запропонованій схемі синхронізації похибка кута нахилу зменшується на 24% порівняно з несинхронізацією. Максимальна похибка кута крену становить  $5,9^\circ$  у разі синхронізації та  $7,71^\circ$  у разі несинхронізації. Отже, похибка кута крену, отримана синхронно, зменшується на 23,5% порівняно з отриманою асинхронно.

Результати роботи можуть використовуватись під час навчального процесу у дисциплінах: «Сенсори фізичних величин», «Цифрові пристрої та мікропроцесорні системи», «Радіоавтоматика», «Радіовимірювання», «Цифрова обробка інформації».

### **Особистий внесок здобувача**

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

## 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ MEMS ПРИСТРОЇВ

MEMS означає Micro-Electro-Mechanical Systems і означає пристрої розміром з мікромметр, які мають як електронні компоненти, так і механічні рухомі частини. Пристрої MEMS можна визначити як пристрої, які мають [1, 2, 3]:

- Розмір у мікрометрах (від 1 мікромметра до 100 мікромметрів).
- Протікання струму в системі (електрична).
- І має рухомі частини всередині (механічні).

Нижче наведено зображення механічної частини пристрою MEMS під мікроскопом. Це може виглядати не дивно, але чи знаєте ви, що розмір спорядження становить 10 мікромметрів, що вдвічі менше людського волосся? Тому дуже цікаво дізнатися, як такі складні структури вбудовуються в мікросхему розміром лише кілька міліметрів.



Рисунок 1.1 – Мікрофотографія MEMS структури

Ця технологія була вперше представлена в 1965 році, але масове виробництво почалося лише в 1980 році. На даний момент існує понад 100 мільярдів MEMS-пристроїв, активних у різних програмах, і їх можна побачити в мобільних телефонах, ноутбуках, системах GPS, автомобілях тощо [1].

Технологія MEMS вбудована в багато електронних компонентів, і їх кількість зростає з кожним днем. З прогресом у розробці дешевших MEMS-пристроїв ми можемо побачити, як у майбутньому вони отримають багато інших застосувань [4-7].

Оскільки MEMS-пристрої працюють краще, ніж звичайні пристрої, якщо не буде використана краща технологія, MEMS залишиться на вершині. У

технології MEMS найбільш помітними елементами є мікросенсори та мікроприводи, які відповідним чином класифікуються як перетворювачі. Ці перетворювачі перетворюють енергію з однієї форми в іншу. У випадку мікросенсорів пристрій зазвичай перетворює виміряний механічний сигнал в електричний сигнал, а мікропривід перетворює електричний сигнал у механічний вихід.

Нижче описано декілька типових датчиків на основі технології MEMS [1-10].

- Акселерометри.
- Датчики тиску.
- Мікрофон.
- Магнітометр.
- Гіроскоп.

### 1.1 MEMS: мікроелектромеханічні системи

Навіть у повсякденному житті нас з усіх боків оточують мікроскопічні пристрої: гіроскопи, акселерометри, мікрофони та інші датчики. Всім цим ми користуємось, ні про що не замислюючись [3].

Наномірні структури в даний момент є свого роду фронтіром - переднім краєм науки, який поки що тільки підкорюють вчені-піонери. А ось мікросвіт вже досить давно освоєний і в ньому йде будівництво. Мабуть, найбільш вражаючим типом мікроструктур, що створюються людьми, є MEMS – мікроелектромеханічні системи.

Зазвичай MEMS ділять на два типи: сенсори – вимірювальні пристрої, які переводять ті чи інші фізичні впливи на електричний сигнал, та актуатори (виконавчі пристрої) – системи, які займаються зворотним завданням, тобто переведенням сигналів у ті чи інші дії.

Найбільш розпоширенішими з MEMS-сенсорів є датчики руху. Вони останнім часом дуже широко застосовуються це телефони, комунікатори, ігрові приставки, фотокамери та ноутбуки все частіше і частіше постачаються акселерометрами (датчиками прискорення) та гіроскопами (датчиками повороту) [1].

У мобільних телефонах та відеопроставках чутливість до рухів користувача використовується в основному, як додаткові можливості гаджету. А ось у портативних комп'ютерах акселерометри виконують дуже корисну функцію: вловлюють момент, коли жорсткий диск може зазнати пошкодження через удар і паркують його головки. У фототехніці використання датчиків руху

не менш актуальне – саме на їхній основі працюють системи стабілізації зображення [11].

Міркувати про те, що насправді корисніше - активні ігри на Wii, функція автоматичного повороту картинки на iPhone, захист вінчестера або можливість знімати фотографії без стабілізації. Покупцям подобається і те, й інше. Тому виробники останнім часом намагаються якомога щільніше використовувати датчики руху.

Благо, можливостей у них для цього достатньо: автовиробники (з масових індустрій вони першими випробували такого роду пристрої) вже кілька десятиліть активно експлуатують датчики руху, наприклад, у подушках безпеки та антиблокувальних системах гальм [3, 5, 7].

Так що відповідні чіпи давно розроблені, випускаються цілим рядом великих і порівняно дрібних компаній і виробляються в таких кількостях, що ціни давно надійно збиті до мінімуму. Типовий MEMS-акселерометр сьогодні коштує кілька доларів за штуку і є мініатюрним. Наприклад, розмір корпусу п'єзогіроскопа Epson XV-8000 становить 6x4,8x3,3 мм, а тривісного акселерометра LIS302DL виробництва ST Microelectronics - лише 3x5x0,9 мм [1]. Причому саме про розміри готового пристрою з корпусом і контактами – сам кристал ще менше.

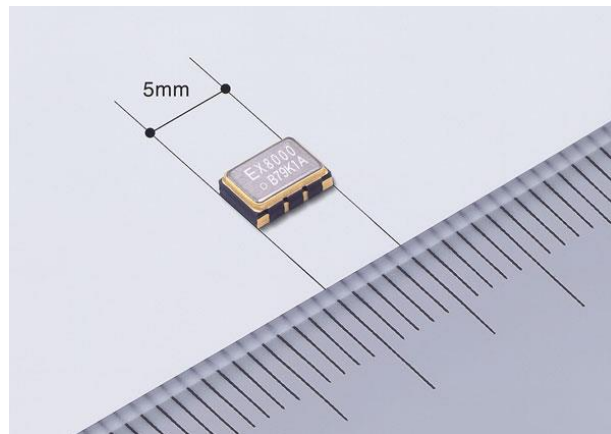


Рисунок 1.2 – Датчик руху Epson XV-8000

На сьогоднішній день найбільш популярними є датчики руху, засновані на конденсаторному принципі. Рухлива частина системи – класичний вантаж на підвісах. За наявності прискорення вантаж зміщується щодо нерухомої частини акселерометра. Обкладка конденсатора, прикріплена до грузика, зміщується щодо обкладення нерухомої частини. Місткість змінюється, при незмінному заряді змінюється напруга - цю зміну можна виміряти і розрахувати зсув грузика [3, 5, 7]. Звідки, знаючи його масу та параметри підвісу, легко знайти і прискорення.



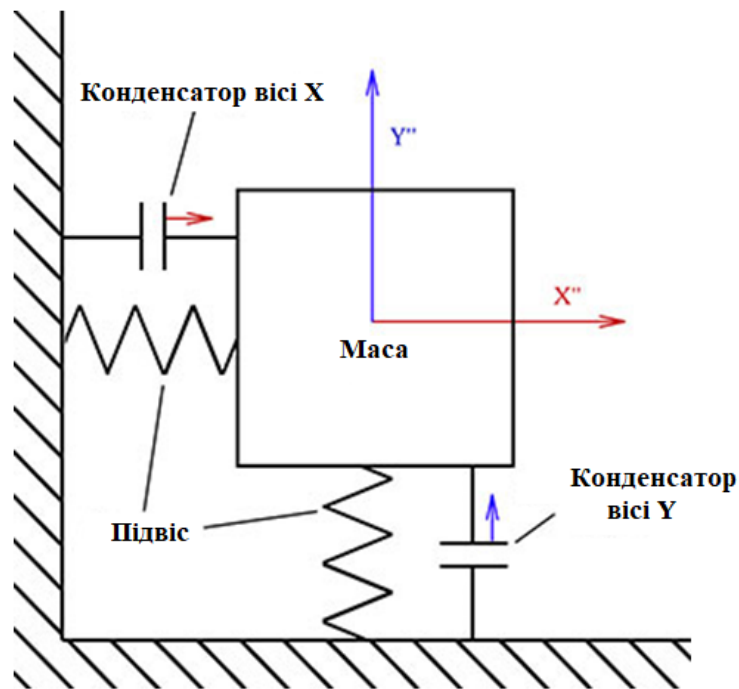


Рисунок 1.3 – Основний принцип роботи конденсаторних акселерометрів

На практиці, MEMS-акселерометри влаштовані таким чином, що відокремити один від одного складові - грузик, підвіс, корпус і обкладки конденсатора - не так просто. Власне, витонченість MEMS у тому і полягає, що в більшості випадків в одній деталі тут вдається (а точніше, просто доводиться) комбінувати відразу кілька предметів.

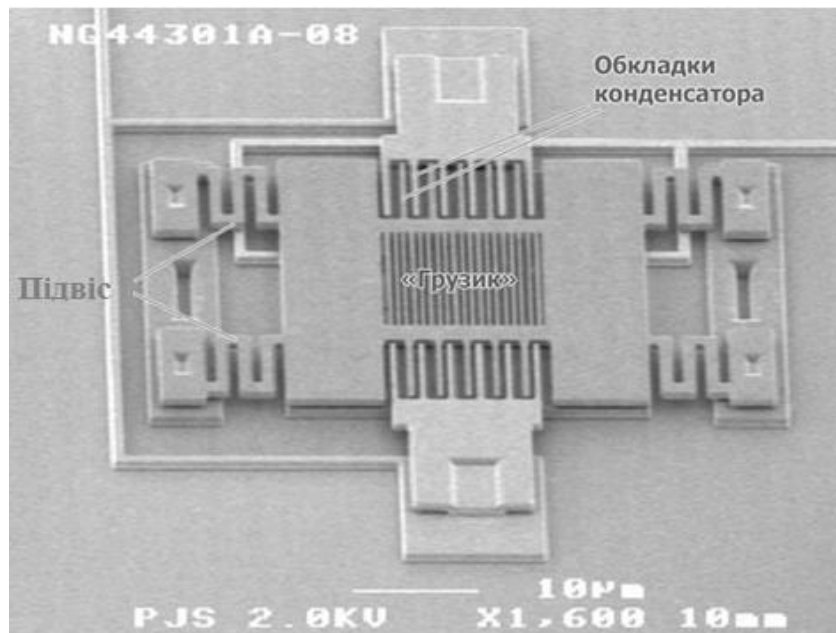


Рисунок 1.4 – MEMS-акселерометр розробки Sandia Labs

Найчастіше, сучасні MEMS-гіроскопи влаштовані ідентично до акселерометрів. Просто в них значення прискорень по осях перераховуються на

значення кутів повороту - конструкція приблизно та ж, але на виході інша величина [3].

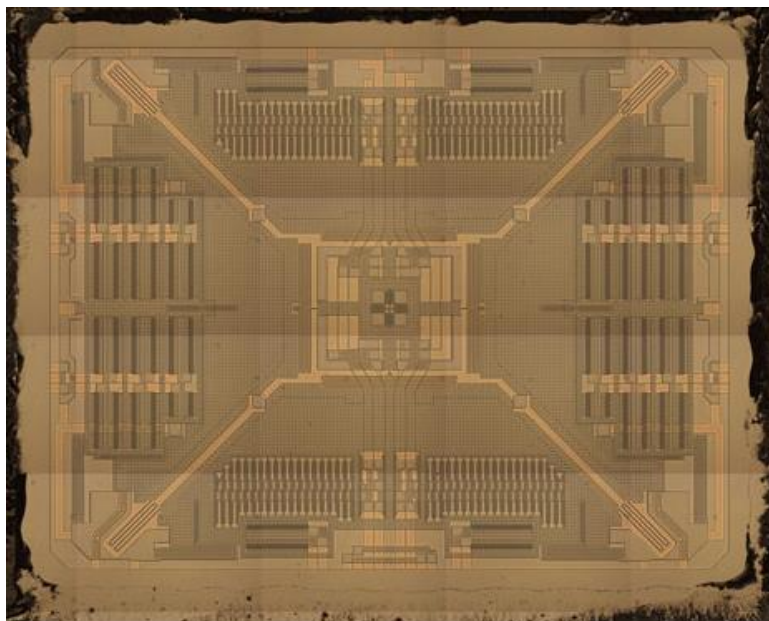


Рисунок 1.5 – Гіроскоп L3G4200D виробництва ST Microelectronics використовується в iPhone 4

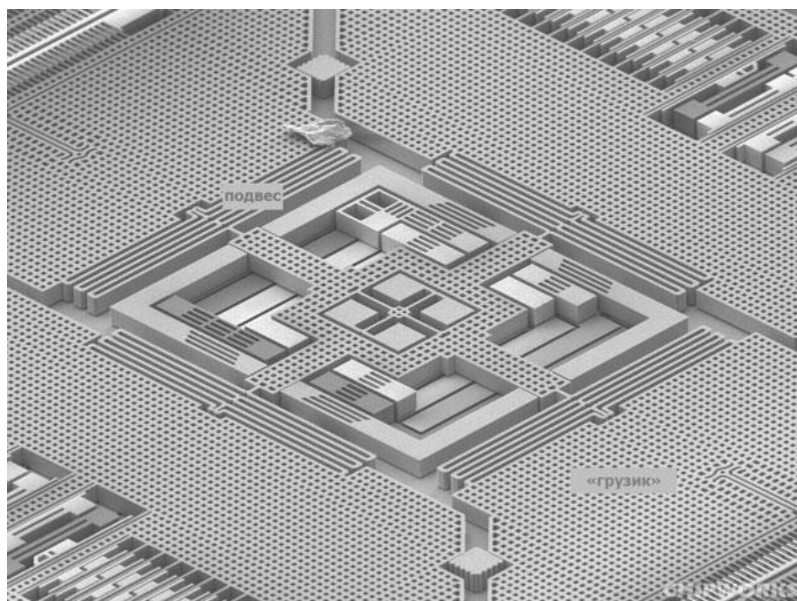


Рисунок 1.6 – STM L3G4200D

Однак зустрічаються і гіроскопи, пристрій яких "заточений" саме під обертання. Такі MEMS – одні з найкрасивіших [1].

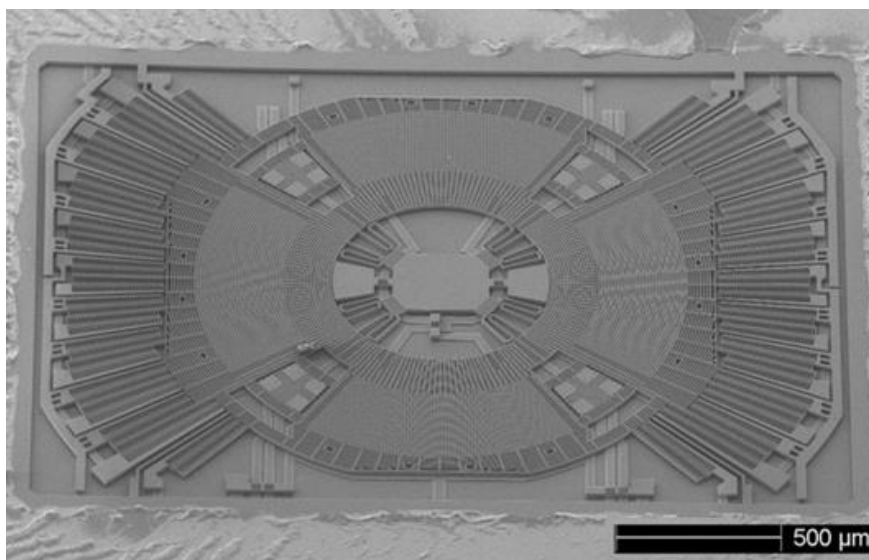


Рисунок 1.7 – Гіроскоп ST Microelectronics – LYPR540AH

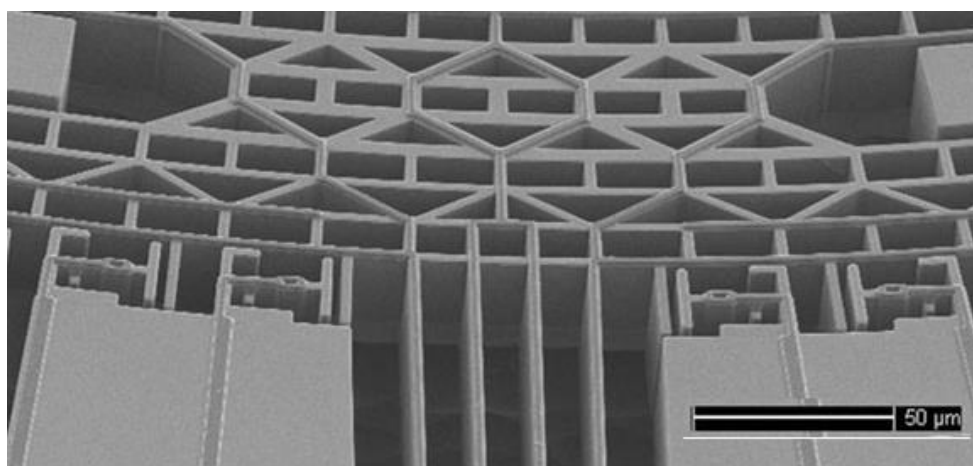


Рисунок 1.8 – STM LYPR540AH. Товщина деталей близько 3 мкм

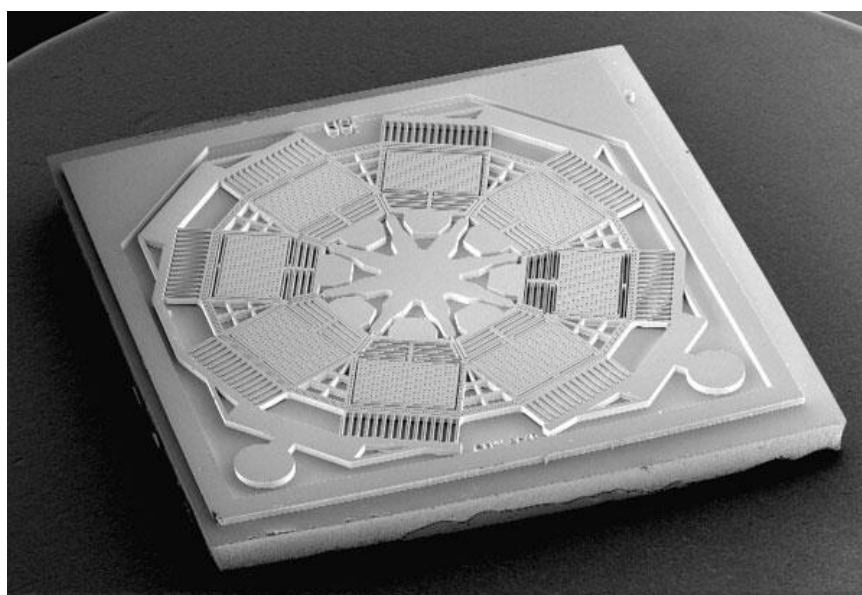


Рисунок 1.9 – MEMS-гіроскоп

Крім конденсаторних датчиків, існують MEMS-акселерометри, які використовують інші принципи. Наприклад, датчики, засновані на п'єзоэффекті. Замість усунення обкладок конденсатора, в акселерометрах такого типу відбувається тиск вантажу на п'єзокристал. Основний принцип той самий, що й у п'єзозапальничках – під впливом деформації п'єзоелемент виробляє струм [11-15]. Зі значення напруги, знаючи параметри системи, можна знайти силу, з якою грузик тисне на кристал - і, відповідно, розрахувати прискорення, що шукається.

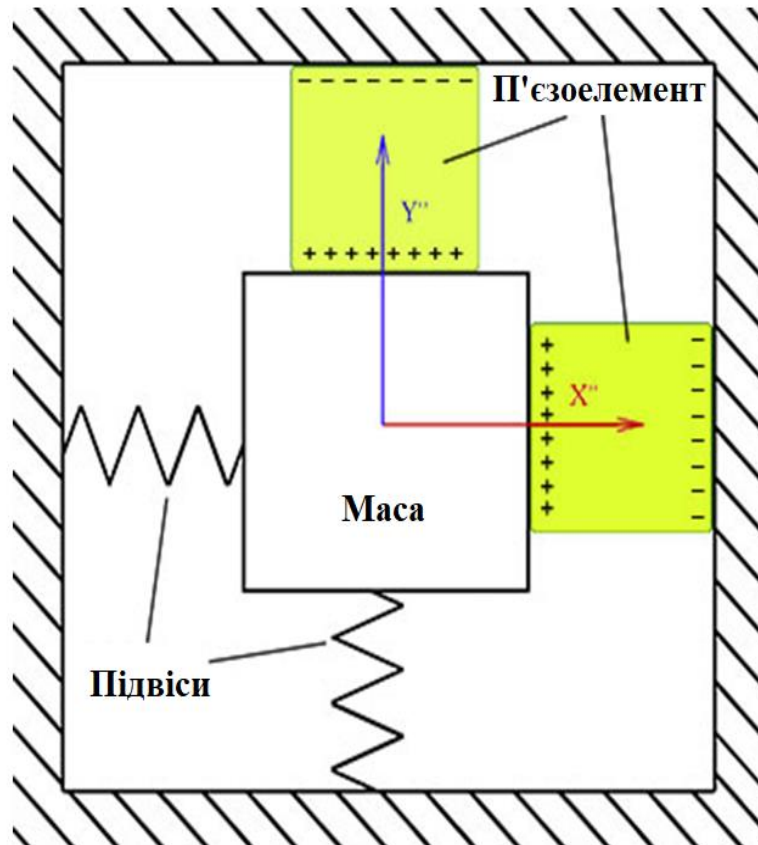


Рисунок 1.10 – Основний принцип роботи акселерометрів на п'єзоелементах

Є також більш екзотичніший тип MEMS-акселерометрів – термальні датчики прискорення. У них як основний об'єкт використовується гаряча бульбашка повітря. При русі бульбашка відхиляється від центру системи, це відстежується датчиками температури. Чим далі змістилася бульбашка – тим більша величина прискорення [12, 15].



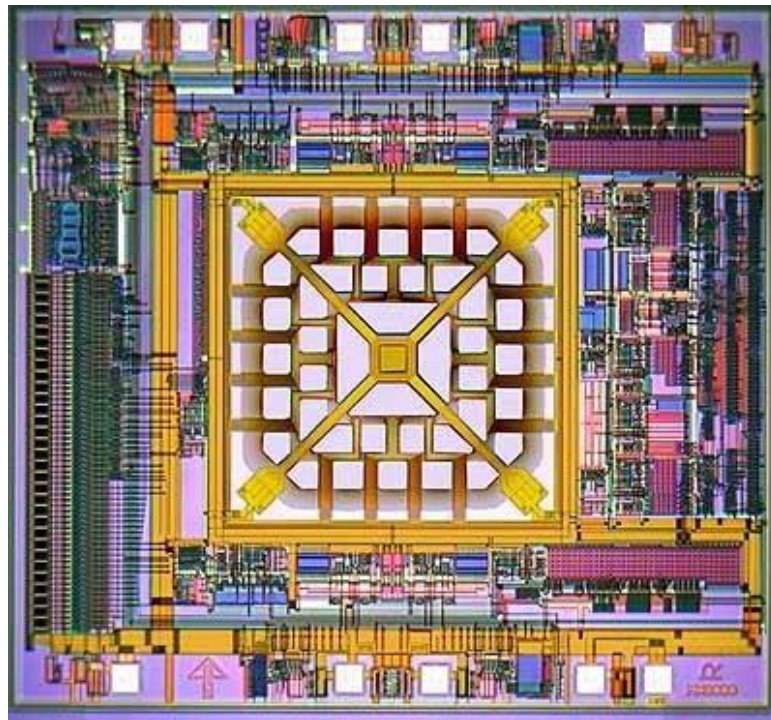


Рисунок 1.11 – Двохосний термальний акселерометр

## 1.2 MEMS мікрофони та сенсори тиску

Не менш популярний у статтях та оглядах, але набагато масовіший тип MEMS-пристроїв це мікроскопічні мікрофони. Знов-таки, найпоширенішими системами цього класу є ті, які засновані на конденсаторному принципі. Принципово важливих елементів у такому мікрофоні всього два: це гнучка обкладка – мембрана, і товстіша, нерухома обкладка. Під впливом тиску повітря мембрана зміщується, змінюється ємність між обкладинками при постійному заряді змінюється напруга. Ці дані перераховуються в амплітуди та частоти звукової хвилі [5, 7, 16].

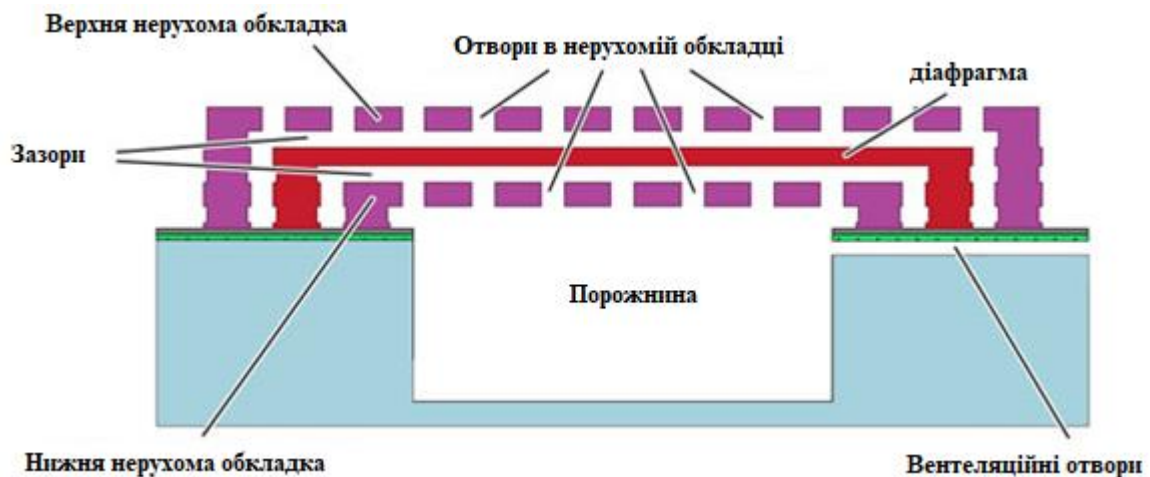


Рисунок 1.12 – Структура MEMS мікрофону



Для мінімізації впливу тиску повітря на нерухоме обкладання, ця обкладка перфорується. Крім того, під нею робиться порівняно велика ніша з обов'язковим отвором вентиляційним [16-19]. Ідея в тому, що єдиним рухомих елементом у системі в ідеалі має бути мембрана – і тільки вона.

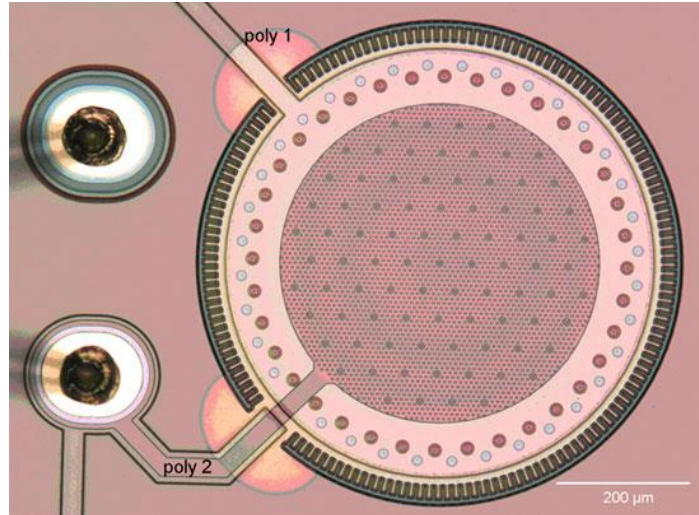


Рисунок 1.13 – Мікроелектромеханічний мікрофон під мікроскопом

Як і у випадку з акселерометрами, тут може бути використаний п'єзо ефект - у цьому випадку під мембраною ставиться п'єзокристал. Далі - як і у випадку п'єзоакселерометрів: тиск повітря передається мембраною на п'єзоелемент, під цим впливом кристал виробляє струм. Напруга вимірюється і перетворюється на амплітуду і частоту звуку [1, 3, 5].

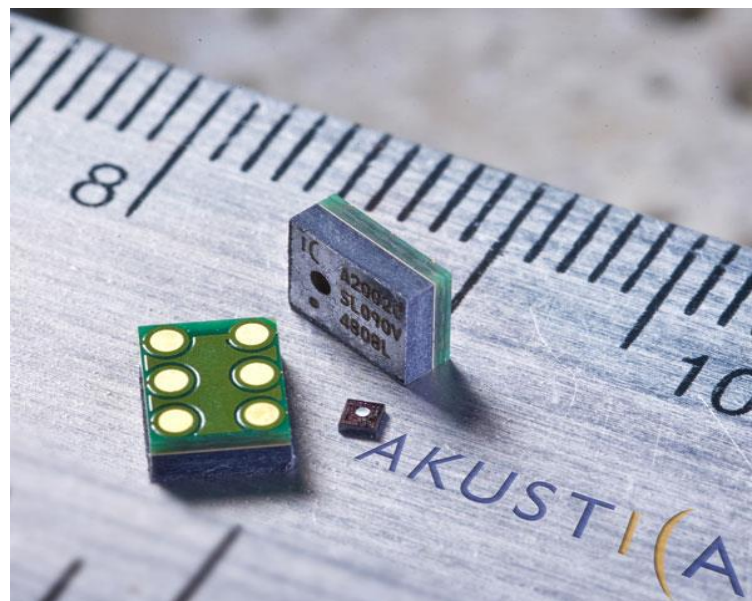


Рисунок 1.14 – Наймініатюрніший MEMS-мікрофон компанії Akustica (площа кристала – 1 кв.мм)

Сенсори, які підходять для звуку, підходять і для вимірювання тиску в інших областях. Подібні до мікрофонів MEMS-системи можуть використовуватися як датчики тиску. Застосування такі сенсори знаходять у безлічі областей. Але можна виділити одну область, яка є найбільш цікавою та специфічною для датчиків тиску, заснованих на MEMS-технології. Це медицина. В даному випадку розмір дійсно має значення. Якщо в якийсь трубопровід цілком можна вбудувати "звичайний", макроскопічний датчик, то з кровоносною судиною такий підхід, не підійде. В даному випадку потрібні дуже компактні рішення [3,5,7].

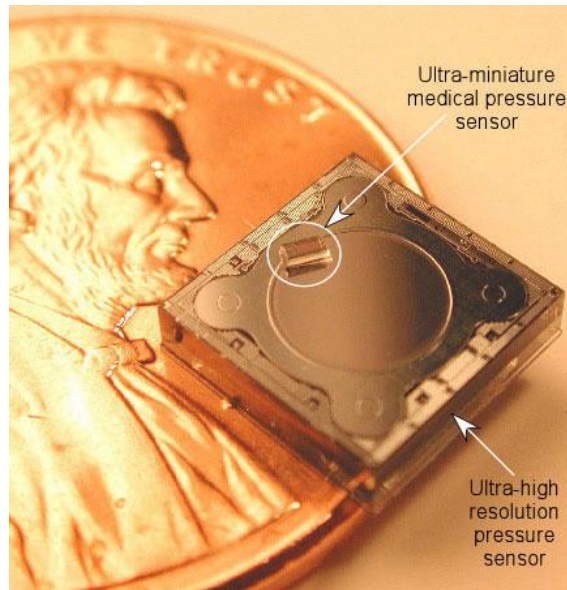


Рисунок 1.15 – Ультракомпактний та високоточний датчики тиску

Зрозуміло, в медицині потрібні не тільки датчики тиску. Існує безліч мікроскопічних біодатчиків, що вимірюють безліч різноманітних величин – від температури до рівня глюкози. Є й несподіваніші пристрої, на кшталт мікроскопічних систем подачі ліків [2, 4, 6].

Розглянемо ще декілька сенсорів тиску і MEMS мікрофонів.



Рисунок 1.16 – Сенсори тиску в мікрокорпусах

При натисканні на предмет він буде напружуватися, поки не досягне точки розриву. Ця деформація прямо пропорційна прикладеному тиску до певної межі, і ця властивість використовується для розробки датчика тиску MEMS. На рис.1.17 показано конструкцію датчика тиску MEMS [18].

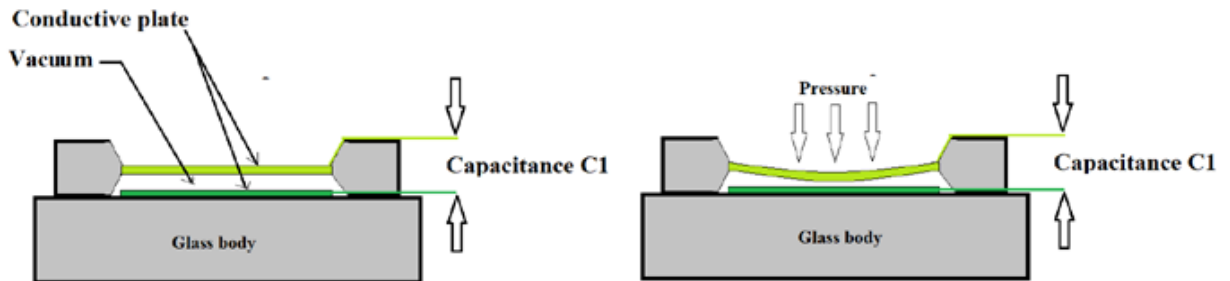


Рисунок 1.17 – Схематичне зображення сенсора тиску

У даній конструкції дві провідні пластини встановлені на скляному корпусі, і між ними буде вакуум. Одна пластина провідника нерухома, а інша пластина є гнучкою, щоб рухатися під тиском [18]. Тепер, якщо ви візьмете вимірювач ємності та знімете показання між двома вихідними клемми, ви зможете спостерігати значення ємності між двома паралельними пластинами, це тому, що вся установка діє як конденсатор з паралельними пластинами. Оскільки він діє як конденсатор з паралельними пластинами, то, як зазвичай, усі властивості типового конденсатора тепер застосовуються до нього. За умови спокою назвемо ємність між двома пластинами  $C1$ . Тепер, якщо натиснути на верхній шар, він деформується і переміститься ближче до нижнього шару, як показано на рис.1.17. Оскільки шари зближуються, ємність між двома шарами збільшується. Таким чином, більша відстань зменшує ємність, а менша відстань – більшу ємність. Якщо ми підключимо цю ємність до RC-резонатора, тоді ми зможемо отримати частотні сигнали, що представляють тиск [16-19]. Цей сигнал можна передати мікроконтролеру для подальшої обробки даних.

Розглянемо ще одну конструкцію мікрофону за MEMS технологією (рис.1.18).

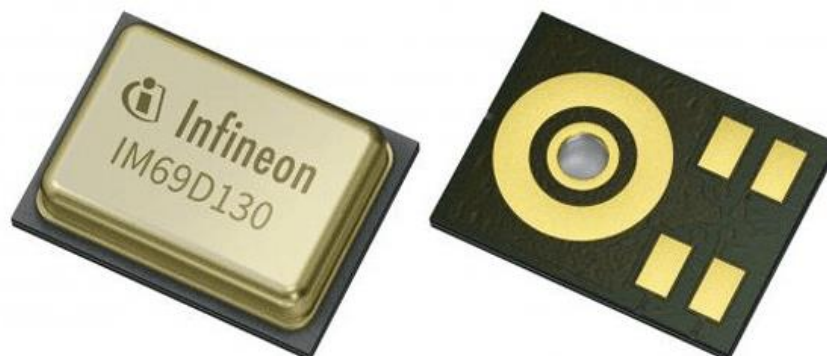


Рисунок 1.18 – Конструкція мікрофону за MEMS технологією

Конструкція мікрофона MEMS схожа на датчик тиску, а на рис.1.19 показано внутрішню структуру мікрофона.

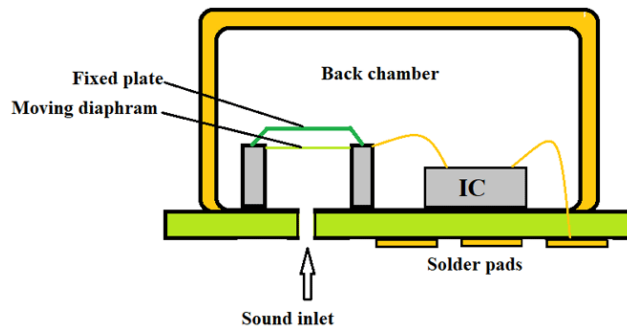


Рисунок 1.19 – Конструкція мікрофона MEMS

Розглянемо установку в стані спокою, і в цих умовах ємність між нерухомою пластиною та діафрагмою дорівнює  $C_1$ . Якщо в навколишньому середовищі є шум, то звук надходить у пристрій через вхідний отвір. Цей звук змушує діафрагму вібрувати, через що відстань між діафрагмою та нерухомою пластиною постійно змінюється. Це, в свою чергу, призводить до безперервної зміни ємності  $C_1$ . Якщо ми підключимо цю змінну ємність до відповідної мікросхеми обробки, ми зможемо отримати електричний вихід для змінної ємності [18]. Оскільки зміна ємності безпосередньо пов'язана з шумом, цей електричний сигнал можна використовувати як перетворену форму вхідного звуку.

### 1.3 MEMS акселерометри

Перш ніж приступити до проектування, розглянемо принцип роботи, який використовується при розробці акселерометра MEMS, і для цього розглянемо схему масової пружини, показану на рис. 1.20.

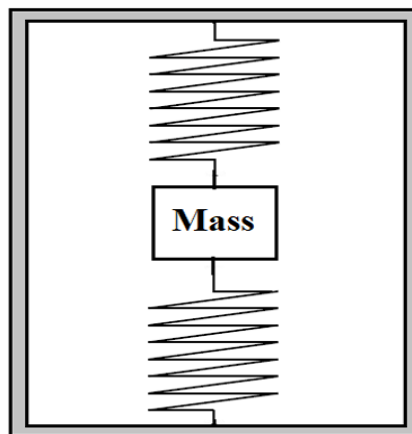


Рисунок 1.20 – MEMS акселерометр

В даному пристрої маса підвішена двома пружинами в замкнутому просторі, і установка вважається станом спокою. Тепер, якщо тіло раптово починає рухатися вперед, маса, підвішена в тілі, відчуває силу назад, яка спричиняє зміщення його положення, і через це зміщення пружини деформуються, як показано нижче (див. рис.1.21) [1]. Це явище ми також повинні відчувати, коли сидимо в будь-якому транспортному засобі, що рухається, наприклад в автомобілі, автобусі, поїзді тощо, тому те саме явище використовується при розробці акселерометрів.

Тепер розглянемо подібний сценарій але замість маси ми будемо використовувати провідні пластини як рухому частину, прикріплену до пружин. Усе налаштування буде таким, як показано нижче.

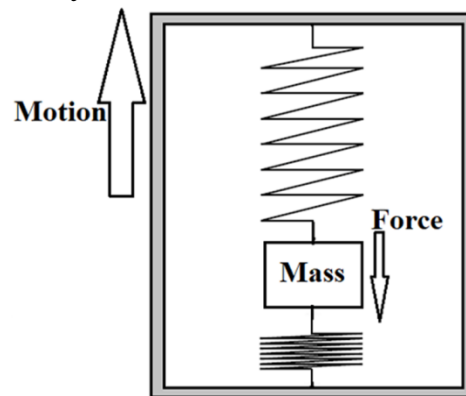


Рисунок 1.21 – Схематичне зображення пояснення роботи MEMS акселерометра

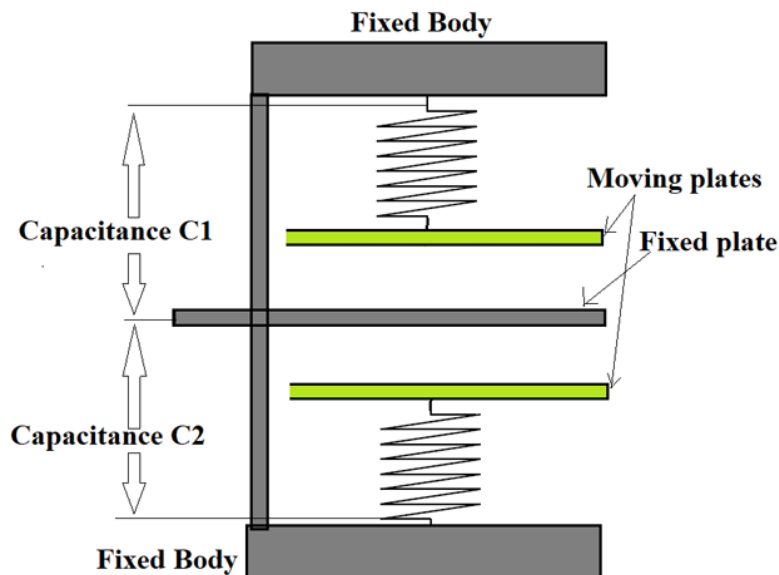


Рисунок 1.22 – Схематичне зображення ємнісного MEMS акселерометра

На схемі ми розглянемо ємність між верхньою рухомою пластиною та нерухомою пластиною [1, 3]:



$$C_1 = \frac{e_0 A}{d_1}, \quad (1.1)$$

де  $d_1$  – відстань між ними.

Значення ємності  $C_1$  обернено пропорційно відстані між верхньою рухомою пластинною та нерухомою пластинною. Ємність між нижньою рухомою пластинною та нерухомою пластинною [1, 3]

$$C_2 = \frac{e_0 A}{d_2}, \quad (1.2)$$

де  $d_2$  – відстань між ними

Значення ємності  $C_2$  обернено пропорційно відстані між нижньою рухомою пластинною та нерухомою пластинною.

Коли тіло знаходиться в стані спокою, верхня і нижня пластини будуть на однаковій відстані від нерухомої пластини, тому ємність  $C_1$  буде дорівнювати ємності  $C_2$ . Але якщо тіло раптово рухається вперед, пластини зміщуються, як показано нижче.

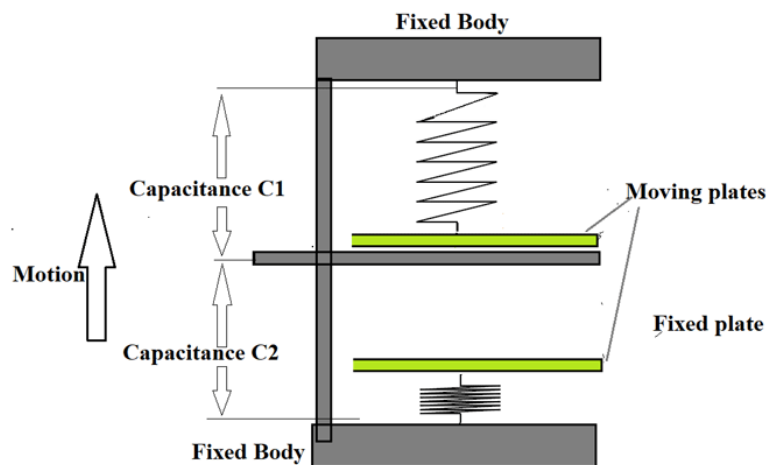


Рисунок 1.23 – Схематичне зображення ємнісного MEMS акселерометра при зміні прискорення

При дії прискорення ємність  $C_1$  збільшується, оскільки відстань між верхньою пластинною та нерухомою пластинною зменшується. З іншого боку, ємність  $C_2$  зменшується зі збільшенням відстані між нижньою пластинною та нерухомою пластинною. Це збільшення та зменшення ємності лінійно пропорційно прискоренню основного корпусу, тому чим вище прискорення, тим вище зміна, а менше прискорення – менша зміна.

Ця змінна ємність може бути підключена до RC генератора або іншу схему, щоб отримати відповідне значення струму або напруги. Отримавши бажане значення напруги або струму, ми можемо легко використовувати ці дані для подальшого аналізу [1, 3, 5].

Хоча цю установку можна використовувати для успішного вимірювання прискорення, вона громіздка і непрактична. Але якщо ми використовуємо технологію MEMS, ми можемо зменшити всю установку до розміру кількох мікрометрів, що зробить пристрій більш придатним.

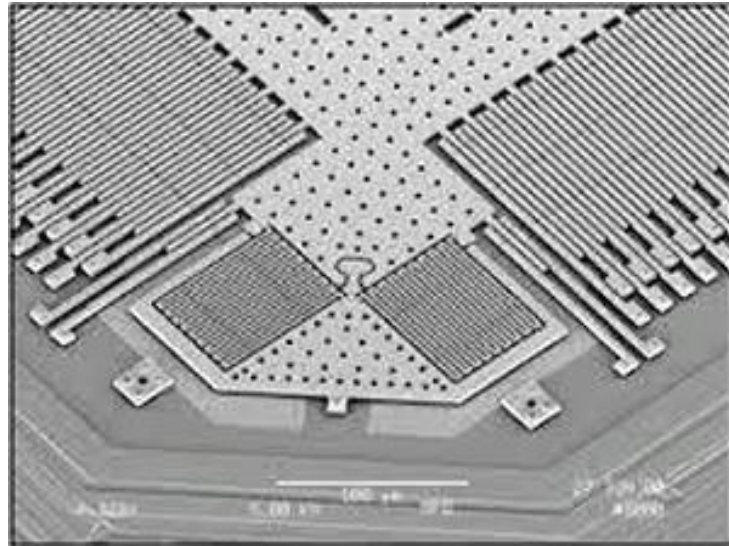


Рисунок 1.24 – Зображення ємнісного MEMS акселерометра

На наведеному вище рисунку можна побачити фактичне налаштування, що використовується в акселерометрі MEMS. Тут кілька пластин конденсатора організовані як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку для вимірювання прискорення в обох напрямках. Конденсаторна пластина має розмір у кілька мікрометрів, а вся установка матиме розмір до кількох міліметрів, тож ми можемо легко використовувати цей MEMS-акселерометр у портативних пристроях, що працюють від батарейок, наприклад у смартфонах [1-13].

#### 1.4 MEMS гіроскопи

Гіроскоп MEMS дуже популярний і використовується в багатьох додатках (рис.1.25). Наприклад, ми можемо знайти MEMS-гіроскоп в літаках, системах GPS, смартфонах тощо. MEMS-гіроскоп розроблений на основі ефекту Коріоліса. Щоб зрозуміти принцип і роботу MEMS-гіроскопа, розглянемо його внутрішню структуру [12].



Рисунок 1.25 – Зображення MEMS гіроскопа

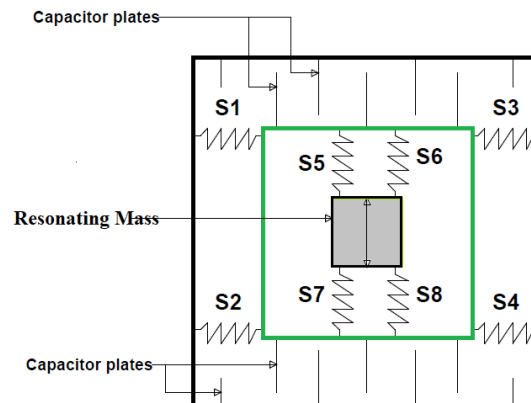


Рисунок 1.26 – Схематичне зображення MEMS гіроскопа

На рис.1.26 позначення: S1, S2, S3 і S4 - це пружини, які використовуються для з'єднання зовнішньої петлі та другої петлі. У той час як S5, S6, S7 і S8 - це пружини, які використовуються для з'єднання другої петлі та маси "М". Ця маса буде резонувати вздовж осі Y, як показано напрямками на малюнку. Крім того, цей ефект резонансу зазвичай досягається за допомогою електростатичної сили тяжіння в пристроях MEMS [14].

В умовах спокою ємність між будь-якими двома пластинами на верхньому або нижньому шарі буде однаковою і залишатиметься незмінною, доки не зміниться відстань між цими пластинами.

Припустімо, якщо ми змонтуємо цю установку на диск, що обертається, то відбудеться певна зміна положення пластин, як показано нижче.

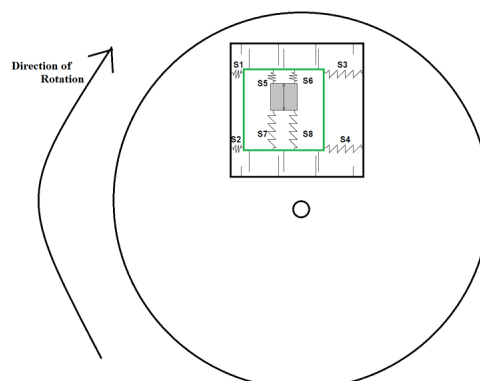


Рисунок 1.27 – Установка MEMS гіроскопа на диск

Коли установку встановлено на диск, що обертається, як показано на рис.1.27, резонансна маса всередині установки відчуватиме силу, що спричиняє зміщення у внутрішній установці. Ви бачите, як усі чотири пружини від S1 до S4 деформуються через це зміщення. Цю силу, яку відчуває резонуюча маса, коли вона раптово поміщає на обертовий диск, можна пояснити ефектом Коріоліса [15].

Якщо ми пропустимо складні деталі, то можна зробити висновок, що через раптову зміну напрямку у внутрішньому шарі є зміщення. Це зміщення також призводить до зміни відстані між пластинами конденсатора як на нижньому, так і на верхньому шарі. Як пояснювалося в попередніх прикладах, зміна відстані спричиняє зміну ємності. І ми можемо використовувати цей параметр для вимірювання швидкості обертання диска, на якому розміщено пристрій.

Багато інших пристроїв MEMS розроблено з використанням технології MEMS, і їх кількість також зростає з кожним днем. Але всі ці пристрої мають певну схожість у роботі та конструкції, тому, розуміючи кілька прикладів, згаданих вище, ми можемо легко зрозуміти роботу інших подібних пристроїв MEMS.

### 1.5 MEMS магнітометр

MEMS-магнітометр використовується для вимірювання магнітного поля землі. Прилад побудований на основі ефекту Холла або магніторезистивного ефекту (рис.1.28) [3, 7].

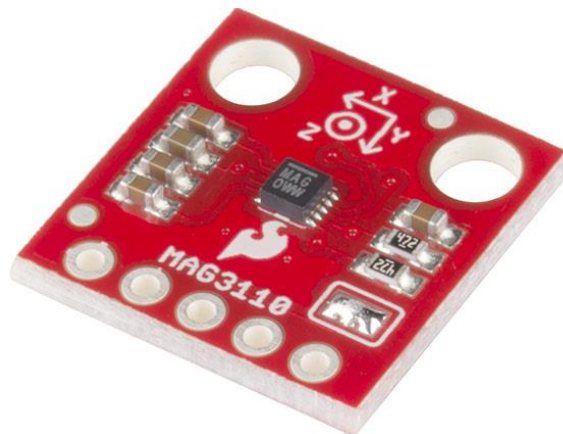


Рисунок 1.28 – MEMS-магнітометр

Більшість магнітометрів MEMS використовують ефект Холла, тому ми обговоримо, як цей метод використовується для вимірювання напруженості магнітного поля. Для цього розглянемо провідну пластину, а кінці однієї сторони її під'єднаємо до батареї, як показано на рис.1.29.

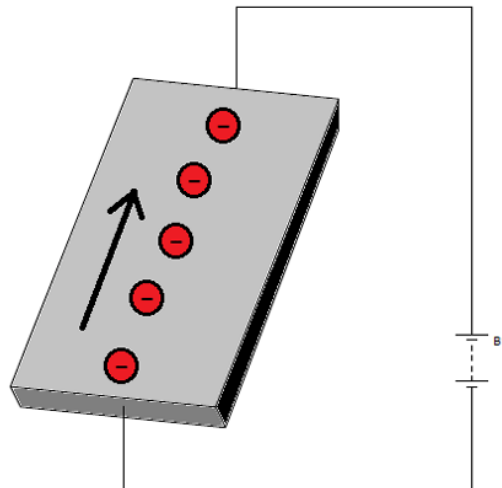


Рисунок 1.29 – Принцип роботи MEMS-магнітометру

Із рис.1.29 можна побачити напрямок потоку електронів, який є від негативного до позитивного терміналу. Тепер, якщо магніт наблизити до верхньої частини провідника, електрони та дірки в провіднику розподіляються, як показано на рис.1.30 [5].

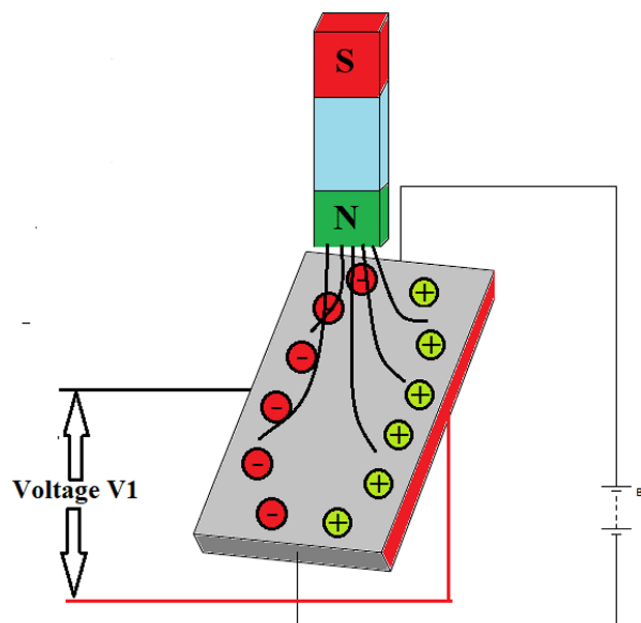


Рисунок 1.30 – Розподіл електронів та дірок в MEMS-магнітометру

Тут протони, що несуть позитивний заряд, збираються на одній стороні площини, а електрони, що несуть негативний заряд, збираються на протилежній стороні. У цей час, якщо ми візьмемо вольтметр і з'єднаємо обидва кінці, тоді ми отримаємо показання. Цей показник напруги  $V1$  пропорційний напруженості поля, яке відчуває провідник у верхній частині. Повне явище генерації напруги шляхом застосування струму та магнітного поля називається ефектом Холла.

Якщо спроектувати просту систему з використанням MEMS на основі наведеної вище моделі, тоді ми отримаємо перетворювач, який відчуває напруженість поля та забезпечує лінійно пропорційний електричний вихід [5].

### 1.6 MEMS актуатори

Подібні до DMD пристрої розроблені Фраунгоферівським інститутом напівпровідникових технологій (Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie). Використовуються вони виключно у наукових цілях. Дзеркала в пристроях Фраунгоферовського інституту більші і виконані дещо грубіше.



Рисунок 1.31 – Мікродзеркальна матриця розробки Фраунгоферівського інституту напівпровідникових технологій

Мікродзеркальні матриці – окремий випадок оптичних MEMS. Але є й багато інших мікросистем, що працюють зі світлом. Наприклад, в астрономії існує дуже важливе завдання боротьби зі спотвореннями, що виникають при проходженні світла через неоднорідне середовище – атмосферу. Така сама проблема актуальна і для мікроскопії [3].



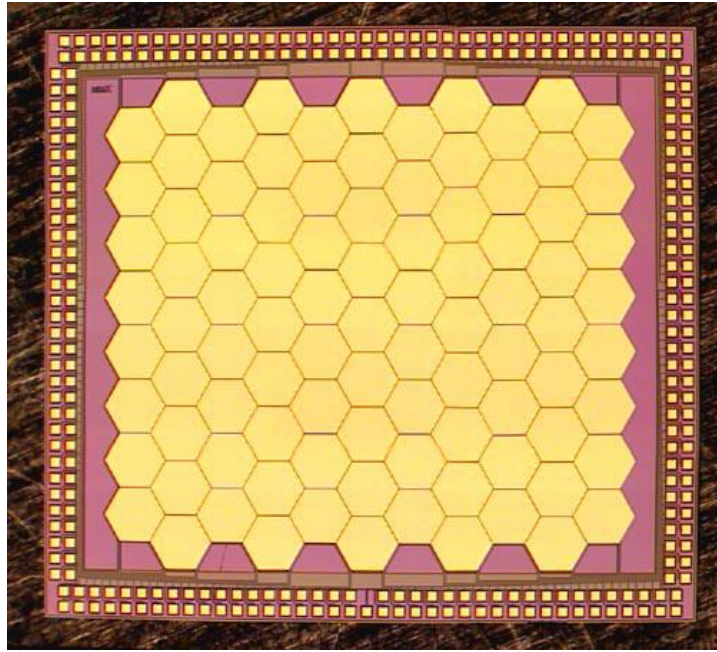


Рисунок 1.32 – Дзеркало зі змінною геометрією, що складається з 93 елементів

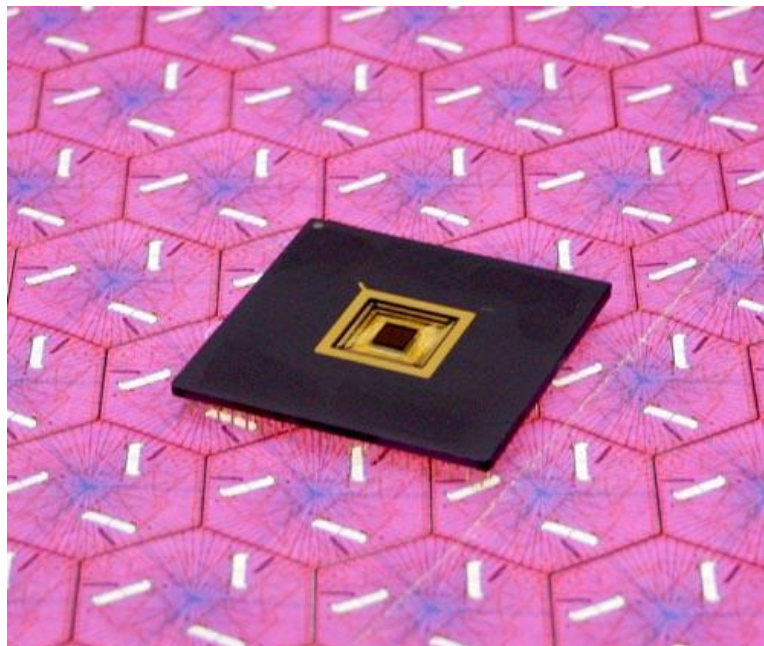


Рисунок 1.33 – Готовий чіп на основі тієї ж системи (розмір 5 на 5 см) на тлі більшого знімка поверхні дзеркала

Завдання вирішується за допомогою адаптивної оптики – зокрема, дзеркал із змінною геометрією. Зрозуміло, існують і такі макроскопічні пристрої. Але MEMS, як завжди, дозволяє знизити ціни і значно збільшити компактність - якщо для телескопів останнє не так вже й важливо, то для мікроскопів це дуже актуально [3, 5]. Такі MEMS складаються з масиву

мікродзеркал, які можуть нахилитися, підлаштовуючи форму поверхні масиву для боротьби зі спотвореннями.

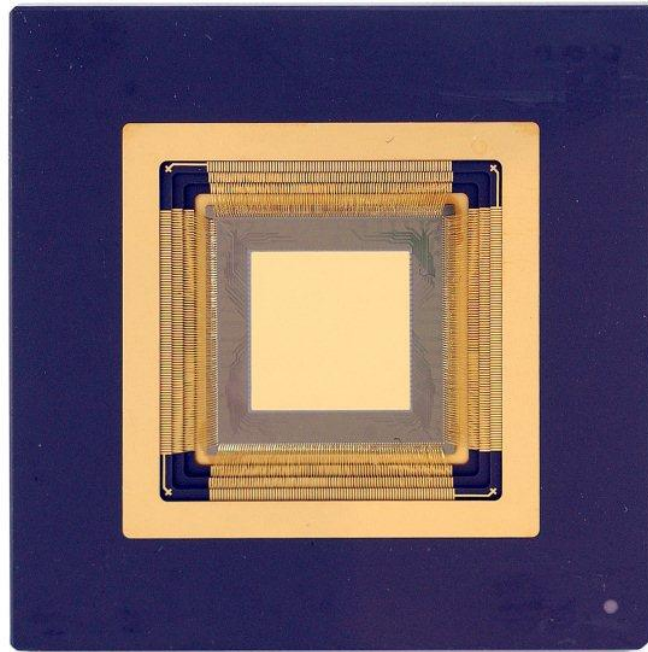


Рисунок 1.34 – Дзеркало із змінною геометрією, що складається з 1020 елементів. Розробка Boston Micromachines Corporation

Ще один цікавий випадок використання мікродзеркал – комутація оптоволоконних мереж. У складних системах задіяні дзеркала, що вміють повертатися не по одній осі, як у DMD-чіпі, а відразу по двох осях. Це дозволяє створювати комутатори з великою кількістю каналів, що обслуговуються (див. рис. 1.35) [17, 19].

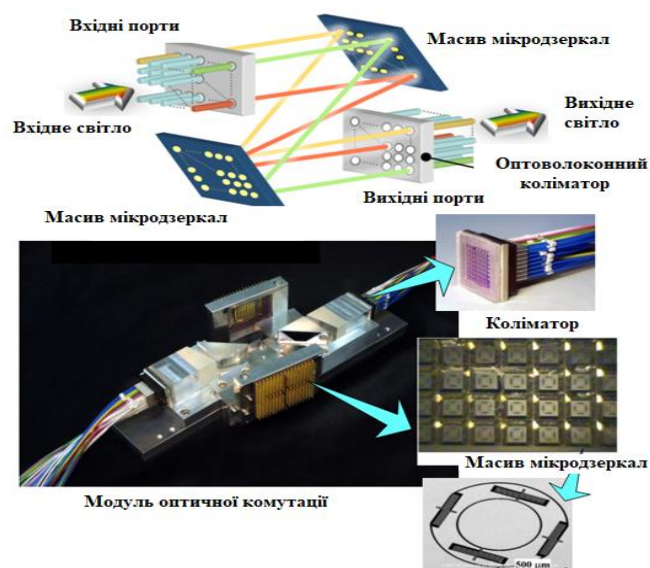


Рисунок 1.35 – Один з варіантів пристрою двовісного мікродзеркала

Сучасні принтери оперують із краплями фарби об'ємом порядку піколітра. А що таке піколітр? Це кулька діаметром близько 13 мікрон. В одному кубічному міліметрі таких крапельок міститься з десяток тисяч! Для того щоб сформувати такий малий об'єм рідини - і сформувати його строго в потрібний момент - очевидно, потрібна найтонша механіка. Тож і тут працює MEMS технологія. Відбувається це в такий спосіб. Друкувальна головка є масивом з безлічі мікроотворів. Під отворами – мініатюрні порожнини, в які чорнило надходить із основного резервуара картриджа [5].

Самі собою чорнило через дюзи не виливаються: діаметр отворів настільки малий, що сила поверхневого натягу не дає рідини просто так витекти назовні. Фарбу потрібно видавити примусово. Для цього можна скористатися кількома різними технологіями.

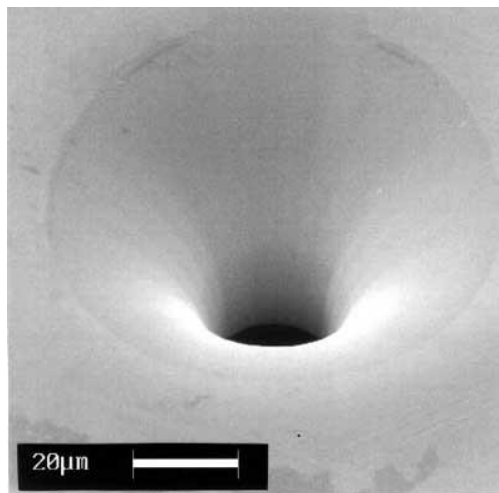


Рисунок 1.36 – Крупний план однієї дюзи друкувальної головки струменевого принтера

Наприклад, можна розмістити в мікропорожнині п'єзоелемент. Приблизно такий самий, як і ті, що використовуються в запальничках. Тільки процес у разі йде у зворотний бік. У запальничках п'єзоелемент виробляє електрику від деформації (наступної від натискання кнопки) кристала. У друкувальній головці принтера на п'єзокристал подається струм, внаслідок чого кристал збільшується в обсязі і штовхає мембрану, яка, у свою чергу, виштовхує фарбу назовні. Саме такий метод використовує компанія Epson.

Найбільш популярний підхід, який практикують компанії HP, Canon та Lexmark: термоструминний друк. У порожнині розміщується нагрівальний елемент, який миттєво нагріває чорнило до високої температури. Рідина закипає, збільшується обсягом і виплескується з порожнини на поверхню [7].

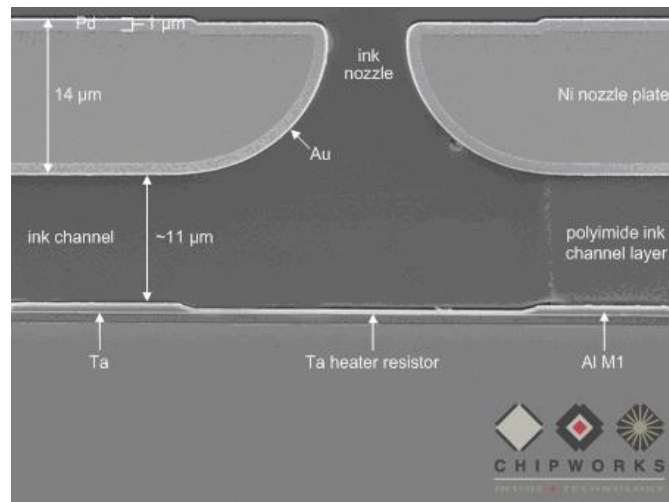


Рисунок 1.37 – Одна з осередків друкуючої головки HP 60 у розрізі

Що цікаво, струменевий друк може бути не тільки кінцевою метою виробництва MEMS, а й проміжним етапом. Справа в тому, що при сучасному рівні розвитку технологій струминного друку вона цілком підходить для виготовлення мікроструктур. Просто кажучи, за допомогою струменевих принтерів можна друкувати ті чи інші мікроелектронні або мікроелектромеханічні пристрої. Просто для цього треба використовувати не звичайне чорнило, а розчини тих речовин, з яких можна виготовити необхідну структуру.

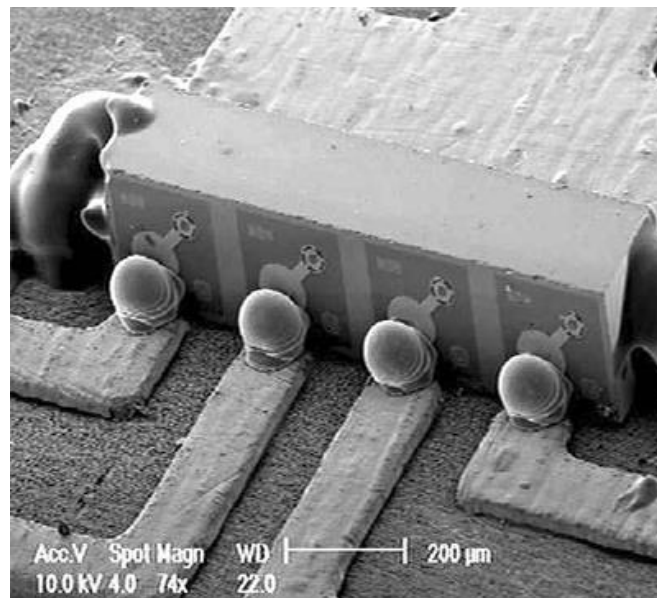


Рисунок 1.38 – «Пайка» контактів на цьому знімку зроблена за допомогою п'єзоструминного друку

Щоправда, є технологічні обмеження: у класичних методах струминного друку не може бути отримана крапля розміру меншого, ніж діаметр отвору, з

якого вона витікає – за таких розмірів вірніше сказати «видавлюється». Втім, якщо є бажання отримати дуже маленьку краплю, то є вихід.

Якщо капіляр із провідною рідиною помістити в електричне поле, то форма поверхні рідини відрізнятиметься від нормальної форми, обумовленої поверхневим натягом. У міру збільшення напруги вона буде все ближче до конуса (так званого конуса Тейлора), а при досягненні якогось порогового значення напруги з кінця цього конуса почнуть відриватися дрібні краплі - їх розмір буде значно меншим за діаметр капіляра [7].

Розглянемо ще один із найбільш вражаючих пристроїв. Це MEMS-транспортер, що складається з масиву мікроскопічних вії. Вії пружні та у «вимкненому» стані вони відігнуті від основи. Щоб притягнути їх до підкладки, використовується вже знайомий нам по DMD-чіп метод – електростатичне тяжіння. Крім того, вії вбудований терморезистор, за рахунок нагріву змінює пружність вії.

Як і в мікродзеркальних матрицях, кожен з елементів системи може займати тільки два положення - верхнє і нижнє, включено/вимкнено - але цього виявляється цілком вистачає для переміщення предметів по поверхні масиву [7].

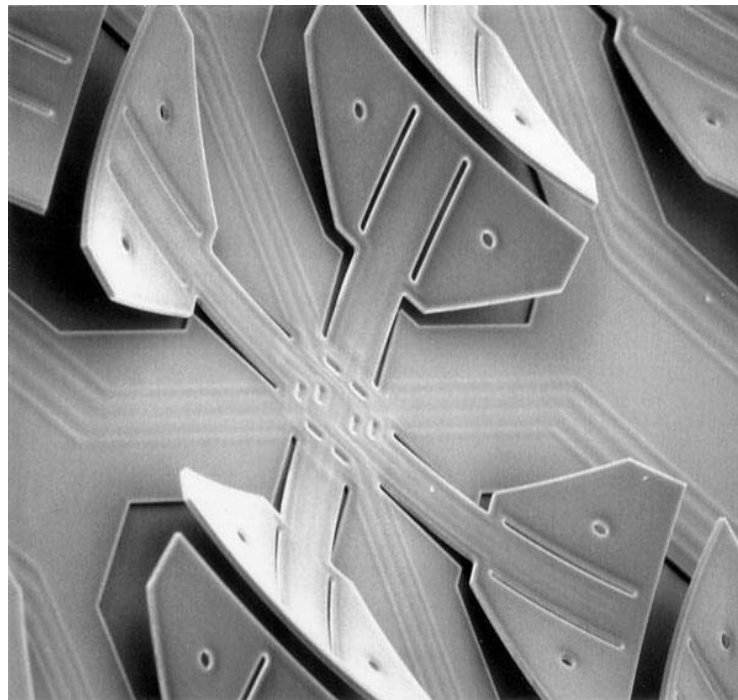


Рисунок 1.39 – Крупний план одного осередку MEMS-транспортера. Розробка лабораторії MEMS Вашингтонського університету



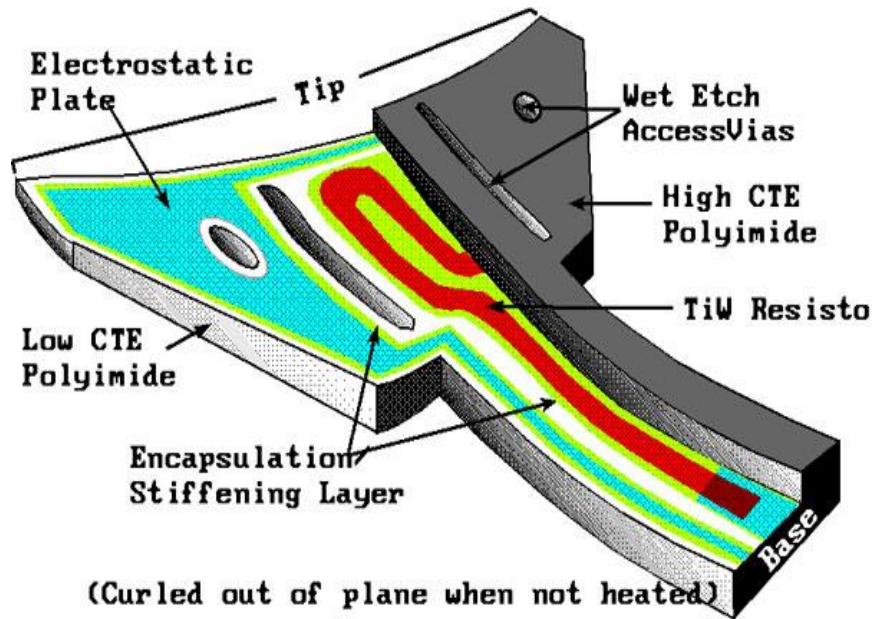


Рисунок 1.40 – Вія MEMS-транспортера в розрізі

Транспортер можна використовувати не тільки для поступального руху вздовж осі масиву. Можна переміщати предмет під будь-яким кутом, його можна навіть обернути – потрібно лише правильно скласти програму.

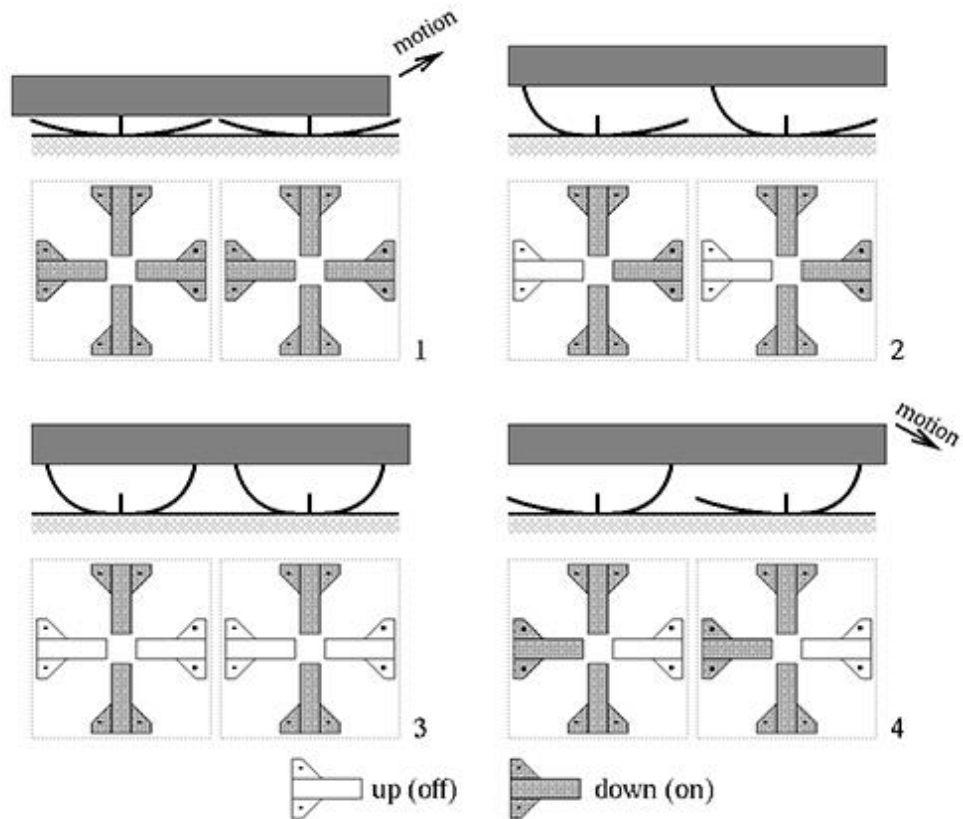


Рисунок 1.41 – Війковий MEMS-транспортер: зразкова схема пересування предмета

Що цікаво, це не єдиний варіант MEMS-транспортера. Наприклад, в Токійському університеті для реалізації подібного функціоналу використовували зовсім інший спосіб: переміщення мікрооб'єктів за допомогою регульованого потоку повітря. Додаткова перевага такого підходу полягає в тому, що він безконтактний – що дозволяє звести до мінімуму ймовірність пошкодження поверхні об'єкта, що переміщується. А працює це так: створюється масив дюз, кожна з яких закривається знизу керованою заглишкою. За рахунок електростатичного тяжіння заглишка може зрушуватися в один чи інший бік. Потік повітря при цьому прямує на об'єкт, що переміщається під кутом – і «здуває» його в потрібному напрямку.

Оскільки дюзи у цій реалізації транспортера можуть працювати лише двох напрямках – «вправо» і «вліво» – масив створюється подвійний: одна частина осередків переміщає об'єкт «вправо-вліво», іншу частина – «вверх-вниз». Залишається тільки написати правильну програму – і, так само, як і з війковим транспортером, предмети можна переміщати досить складними траєкторіями [14-19].

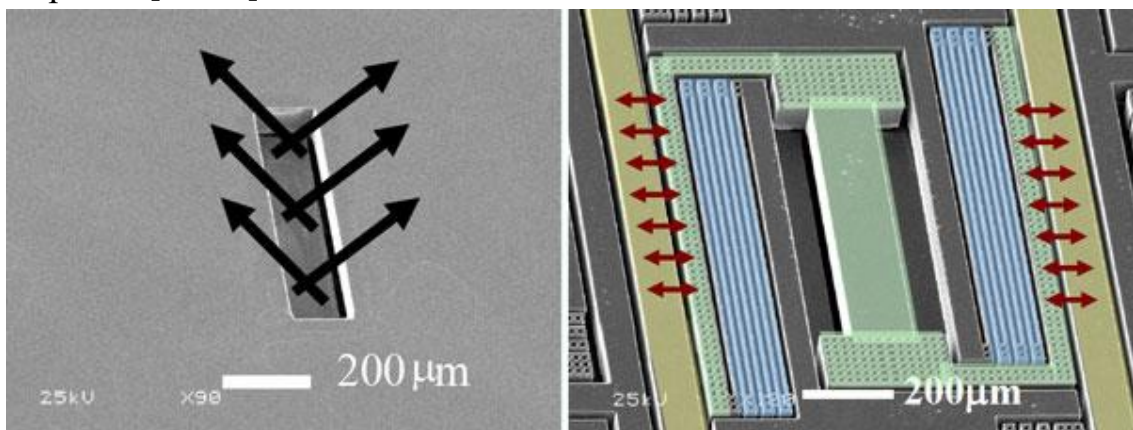


Рисунок 1.42 – Фото однієї дюзи MEMS-транспортера крупним планом. Зліва зображено робочу поверхню транспортера, праворуч – механізм, захований під нею

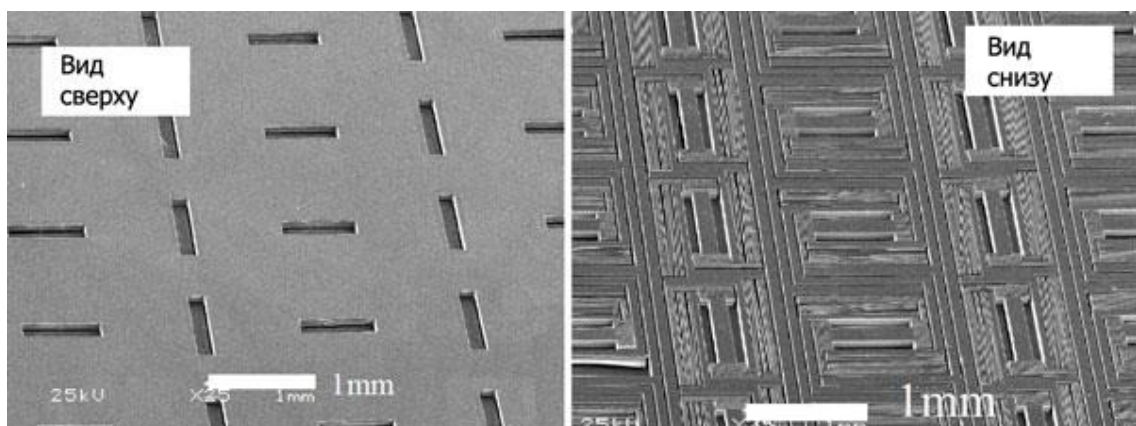


Рисунок 1.43 – Масив дюз MEMS-транспортера

Ті ж принципи можна використовувати, вивернувши навиворіт. Замість переміщення об'єкта поверхнею масиву актуаторів, можна забезпечити такими пристроями сам об'єкт, встановивши актуатори з його нижньої поверхні. Щоправда, поки що досить складно вирішити питання з живленням і масою таких MEMS приладів.

### 1.7 Висновки до розділу

На підставі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки:

1. У технології MEMS найбільш помітними елементами є мікросенсори та мікроприводи, які відповідним чином класифікуються як перетворювачі. Ці перетворювачі перетворюють енергію з однієї форми в іншу. У випадку мікросенсорів пристрій зазвичай перетворює виміряний механічний сигнал в електричний сигнал, а мікропривід перетворює електричний сигнал у механічний вихід.

2. Автомобільна промисловість була однією з перших, яка охопила використання MEMS. Відтоді MEMS знайшли застосування в бездротовому зв'язку, біомедичній, аерокосмічній та споживчій продукції (це лише деякі з них), тому можливості використання MEMS дуже великі.

3. Найбільш розпоширенішими з MEMS-сенсорів є датчики руху. Вони останнім часом дуже широко застосовуються це телефони, комунікатори, ігрові приставки, фотокамери та ноутбуки все частіше і частіше постачаються акселерометрами (датчиками прискорення) та гіроскопами (датчиками повороту), тому цим пристроям буде присвячена дана магістерська кваліфікаційна робота.

## 2 РОЗРОБКА ШВИДКОГО ФІЛЬТРУ AHRS ДЛЯ КОМБІНАЦІЇ АКСЕЛЕРОМЕТРА, ГІРОСКОПА ТА МАГНІТОМЕТРА З ОКРЕМИМИ КОРЕКЦІЯМИ СЕНСОРА

Цифрові системи орієнтації та курсу (AHRS) є важливим компонентом систем навігації та локалізації. Зазвичай він базується на вимірюваннях інерційних одиниць, що складаються з гіроскопів і акселерометрів у поєднанні з магнітометрами. Ця комбінація відома як комбінація магнітного датчика кутової швидкості та сили тяжіння (MARG) або блок магнітного інерційного руху (MIMU). Комбінація MARG використовує переваги різноманітного напрямку вектора прискорення сили тяжіння та векторного магнітного поля в більшості місць на Землі (за винятком магнітних полюсів). Система AHRS спрямована на відображення орієнтації між об'єктом інтересу (координатою тіла) і системою координат, визначеною вектором гравітації та вектором місцевого домінуючого магнітного поля.

Початкові підходи до цієї проблеми базувалися на аналізі миттєвих вимірювань. Знакова стаття Грейс Вахба визначила головну проблему обертання для орієнтації космічного корабля у 1965 році. Мета полягає в тому, щоб знайти правильну матрицю обертання між двома наборами векторів з мінімальним зважена квадратична помилка. Багато подальших внесків були зосереджені на ефективному вирішенні цієї проблеми, включаючи Quaternion ESTimator (QUEST), алгоритм ESOQ, який розв'язує поліномхарактеристичне рівняння КВЕСТ в один крок та багато інших [20-25]. Починаючи з першого рішення, AHRS міг почати розвиватися в різних областях і поєднувати кілька джерел інформації. Мімс і Фаррелл використовували еталон IMU для радарів із синтетичною апертурою в 1970-х роках. У 2000 році магнітометр був використаний для визначення курсу в системі без гіроскопа [26]. Комбінація всіх трьох типів (MARG) була використана в 2004 році Gebre-Egziabher [27].

Однак, оскільки вимірювання всіх датчиків сприйнятливі до збурень, завдання будь-якого методу термоядерного синтезу полягає в тому, щоб максимально відкинути ці збурення. Це часто досягається за допомогою комбінації різних часових характеристик окремих датчиків. У той час як гіроскоп надає чудову інформацію про швидкі зміни орієнтації, він забезпечує лише відносні зміни орієнтації, які піддаються повільному дрейфу, що змінюється залежно від терміну служби та температури. З іншого боку, акселерометр і магнітометр забезпечують пряме вимірювання орієнтації; однак, вимірювання не можна використовувати як еталон у кожен момент, оскільки акселерометр вимірює вектор прискорення сили тяжіння, забруднене

динамічним прискоренням, а магнітометр вимірює магнітне поле Землі, забруднене локальними магнітними аномаліями та різними магнітними збуреннями. Це забруднення також вважається занепокоєнням і потребує відкидання. Характер збурень може відрізнятися в різних сценаріях застосування. Наприклад, динамічні прискорення  $MARG$ , встановленого на нозі людини, що біжить, відрізнятимуться від динамічного прискорення  $MARG$ , встановленого на літаку чи БПЛА. На кожен тип датчика також впливають неузгодженість ортогональності, відхилення чутливості поперечної осі, а також затухання амплітуди та фази над частотою. Нашим основним застосуванням є область розпізнавання рухів людини [28], тому ми зосереджуємо нашу увагу на специфіці цієї області, такій як порушення динамічного прискорення.

Більшість методів термоядерного синтезу дотримуються структури предиктор–коректор, де вимірювання гіроскопа використовуються на етапі прогнозування, а вимірювання акселерометра та магнітометра – на етапі корекції. Для цих фільтрів використовуються різні класи методів проектування, такі як підхід фільтра Калмана, додатковий фільтр або фільтри предиктора–коректора на основі градієнта. Ці підходи відрізняються своїми припущеннями щодо характеру збурень.

Фільтр Калмана базується на теорії стохастичної фільтрації, яка припускає, що збурення слідує гауссовому розподілу як похибки еволюції стану, так і похибок спостереження. Цекласичний підхід [30] використовується в області руху людини з великою кількістю варіантів, див., наприклад, [31] для їх порівняння. Різні розширення зосереджуються на різних аспектах фільтрації, що відрізняються, наприклад, на ефекті нелінійних моделей, який розглядається за допомогою обчислювально витратного фільтра Калмана без аромату [32]. Однак обмежувачим фактором фільтрів на основі Калмана є припущення про розподілене Гауссове збурення. Це було розглянуто розширеннями, що пропонують адаптивні оцінки коваріаційних матриць, див., наприклад, [33] за чудовий відгук. Підходи базуються на різних підходах до моніторингу еволюції помилок оцінювання за допомогою нечітких правил [33], ковзаюча середня оцінка коваріації [34], ланцюги Маркова [35], або сегментовані ковзаючі середні оцінки коваріації [36], щоб назвати кілька прикладів. Перевага продуктивності цих методів зазвичай супроводжується значною обчислювальною ціною, що робить їх непридатними для недорогих, малопотужних програми. Хоча існує кілька методів, що зменшують обчислювальну вартість фільтрів Калмана [37], адаптація коваріаційних матриць завжди дорога.

Додаткова фільтрація [27-32] використовує фільтри низьких та/або високих частот для усунення перешкод із вимірювань. Таким чином, збурення



моделюється як будь-який сигнал, який не проходить через фільтр. Ці фільтри обчислювально набагато дешевші, ніж фільтри Калмана. Налаштування цих фільтрів все ще є складним, особливо в сценаріях, що змінюються в часі, коли змінюється характер збурень.

Третім головним напрямком обробки збурень є градієнтний підхід, вперше запропонований Маджвіком [31], яка базується на припущенні, що дійсне вимірювання лише в межах заздалегідь визначеного інтервалу, а все, що виходить за межі, є порушенням. Хоча існують інші підходи, засновані на градієнті, з використанням інших правил оновлення, таких як Гаусс–Ньютон [32], підхід [31] унікальний тим, що рекомендує нормалізувати градієнт, що є обчислювально дешевою операцією. Подібні ідеї відомі в машинному навчанні як відсікання градієнта [33]. Його відмінні емпіричні показники нещодавно були пояснені за допомогою припущення розслабленої константи Ліпшица оптимізованої функції витрат [34].

У даному розділі розглянуто підхід до створення фільтру обробки даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра, які страждають від серйозних перешкод. Оскільки ці порушення не дотримуються жодного заздалегідь визначеного розподілу ймовірностей, ані частотного спектру, обмеження їх амплітуди (тобто обмеження на константу Ліпшица динамічної моделі) виглядає розумним зробити припущення. Проте в [31] це припущення застосовано до різниці між передбаченням гіроскопа та злитим вектором вимірювання, отриманим за допомогою вирішення проблеми Вахби. Ми припускаємо, що це неоптимально, оскільки амплітуда збурення впливає на напрямок кроку корекції. Тому ми розробили новий крок корекції, який жорстко обмежує амплітуду збурень окремих датчиків. Подібні ідеї щодо розділення впливу датчика були запропоновані для підходу фільтрації Калмана в [36], з іншим припущенням щодо шуму. Це також пов'язано з різними двоетапними підходами [37], однак у більш принциповій формі.

В роботі розглянуто новий фільтр на основі градієнта для AHRS із такими функціями: (i) градієнт корекції від магнітометра та акселерометра обробляється незалежно, (ii) розмір кроку спуску градієнта обмежений функцією корекції незалежно для кожного датчика, і (iii) вектори корекції зливаються з використанням нового наближення правильної операції  $SO(3)$ . Розділення кроків корекції від кожного датчика передбачало серйозну модифікацію оригінального фільтра, як показано на рис.2.1 та наведено в додатку А.

Для кожної операції, яка використовується при проектуванні запропонованого фільтра, ми проаналізували точність її реалізації в групі  $SO(3)$ . Ми надаємо два наближення: (i) точне наближення правильної

операції кватерніона, наскільки це можливо, і (ii) його наближення, спрощене за допомогою, наприклад, лінеаризації. Пропонований фільтр представлений у двох варіантах: роздільний коригуючий фільтр (SCF), що використовує точні операції  $SO(3)$ , і швидкий SCF (FSCF), який складається зі спрощених (лінеаризованих) операцій.

Ми реєстрували вимірювання датчика MARG, встановленого на експериментальній платформі в лабораторії, обладнаній системою оптичного стеження VICON-460. Ми надаємо ці дані як орієнтир із відкритим кодом. Ми порівнюємо продуктивність запропонованого фільтра з вибраними альтернативними фільтрами та демонструємо, що він має вищу точність за менших обчислювальних витрат.

Решта цього розділу організована таким чином: елементарні операції з кватерніонами та їх позначення розглядаються в підрозділі 2.2. Пропонований фільтр детально описано в підрозділі 2.3 включаючи опис кількох можливих наближень правильних операцій  $SO(3)$ . Експериментальні результати наведені в наступних підрозділах, включаючи деталі вимірювання даних і порівняння вибраних конкуруючих фільтрів.

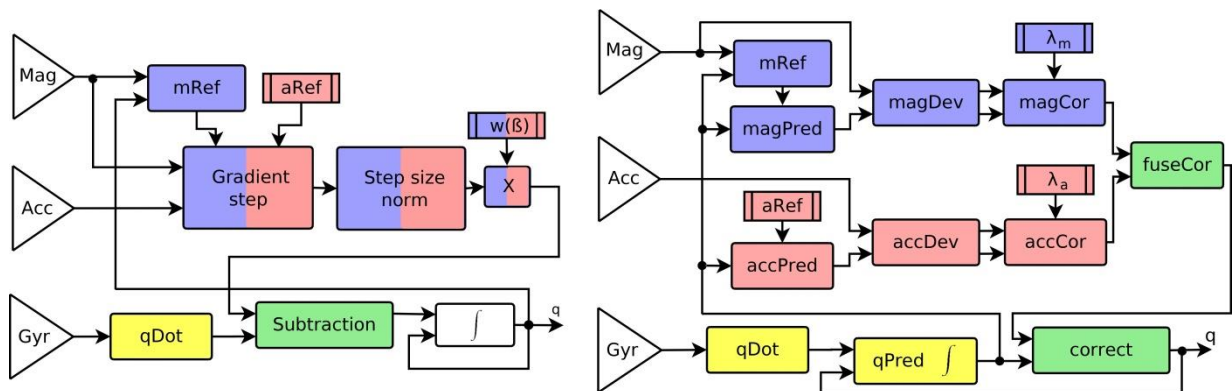


Рисунок 2.1 – Блок-схема фільтра комбінації датчика магнітної кутової швидкості та гравітації (MARG) Маджвіка (ліворуч) і запропонованого розділеного коригувального фільтра (SCF) (праворуч). Жовті блоки позначають передбачення від гіроскопа; Сині блоки позначають поправку від магнітометра; Червоний блокує корекцію акселерометра, а зелений означає злиття кроків корекції та її застосування до прогнозованих значень.

## 2.1 Математична модель операції обертання акселерометра та гіроскопа

У цьому підрозділі розглядаються необхідні ротаційні операції, які використовуються в розроблених фільтрах. Спочатку представлено обертання нормованих векторів в евклідовому просторі, потім описано елементарні операції з кватерніонами. Одиничний вектор  $a$  — це вектор, який має одиничну

норму  $\|a\|=a^T a=1$ , де  $T$  позначає транспозицію. Прямий кут (DA),  $\alpha_{a,b}$ , між двома одиничними векторами,  $a = [a_x, a_y, a_z]^T$  і  $b = [b_x, b_y, b_z]^T$ , визначається як

$$\alpha_{a,b} = \cos^{-1} (a^T b). \quad (2.1)$$

Перехресний добуток двох одиничних векторів  $a$  і  $b$  визначається як

$$\text{cross}(a, b) = [a_y b_z - a_z b_y, a_z b_x - a_x b_z, a_x b_y - a_y b_x]. \quad (2.2)$$

Пропонований фільтр базується на кватерніонах Гамільтона. Для реалізації в цій математичній групі ми використовуємо одиничний кватерніон, який є комплексним числом, що представляє обертання від вихідної системи координат  $f$  до кінцевої системи координат  $f'$ , яке можна записати у векторній формі

$$q_{f,f'} = [q_w, q_x, q_y, q_z] = \left[ \cos \frac{\theta}{2}, u_x i \sin \frac{\theta}{2}, u_y j \sin \frac{\theta}{2}, u_z k \sin \frac{\theta}{2} \right], \quad (2.3)$$

де одиничний вектор  $u$  в системі координат  $f$  визначає вісь обертання (обертання осі виконано), а  $\theta$  кут повороту. Кут повороту  $\theta$  відповідає DA для 3D-векторів.

Обертання кватерніона  $q$  можна перетворити на матрицю обертання  $R$  за допомогою

$$R = \begin{bmatrix} q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2q_x q_y - 2q_w q_z & 2q_x q_z + 2q_w q_y \\ 2q_x q_y + 2q_w q_z & q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2q_y q_z - 2q_w q_x \\ 2q_x q_z - 2q_w q_y & 2q_y q_z + 2q_w q_x & q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Найважливішими операціями з кватерніонами є кватерніонний добуток  $\times$  і кватерніонспряження  $q^{-1}$ , оскільки вони визначають поворот координат вектора  $v$  у системі  $f$  до координат  $v'$  у системі  $f'$

$$v' = q_{f,f'}^{-1} \times v \times q_{f,f'}. \quad q_{a,c}^{-1} = [q_w, -q_x, -q_y, -q_z] = q_{c,a}. \quad (2.5)$$

де  $v$  — чотиривимірний вектор з першим елементом, що дорівнює нулю, за яким йдуть звичайні координати в 3D-просторі. Множення кватерніона  $\times$ ,

$$q_{f,f''} = q_{f,f'} \times q_{f',f''}, \quad (2.6)$$

$$\theta(q) = 2\arctg2(\sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}, q_w). \quad (2.7)$$

Фільтр розроблений як модифікація фільтра Маджвіка, де ми розділяємо внесок кожного датчика в корекцію. Це вимагає заміни розв'язку задачі Вахба. Таким чином, ми не можемо об'єднати інформацію в похідній формі як вихідний фільтр, і ми повинні використовувати абсолютну форму. Зокрема, крок корекції складається з двох важливих частин для кожного датчика незалежно: (i) визначення відстані та напрямку відхилення від прогнозу та (ii) визначення розміру кроку корекції на основі форми коригуючої функції. виправлення обертання визначається за допомогою комбінації напрямків відхилення окремих датчиків, зважених за розмірами їхнього кроку корекції.

Запропонований підхід має незалежне зважування їх внеску в корекцію. Зверніть увагу, що частини корекції від акселерометра та магнітометра майже повністю відокремлені, за винятком визначення магнітного опорного вектора.

Запропонований фільтр може бути реалізований за допомогою кватерніонів або поворотних матриць. Ми представляємо більшість операцій у формулюванні кватерніонів і використовуємо обертальну матрицю у випадках, коли це вигідно з точки зору обчислень. Через обмежену обчислювальну потужність вбудованої системи (найпоширеніший додаток), ми представляємо дві версії фільтра. Фільтр роздільної корекції (SCF) з використанням як точних числових операцій, і фільтр швидкої розділеної корекції (FSCF) з використанням обчислювально ефективних наближень цих операцій. Вплив цих наближень вивчався в моделюванні. Структура цих двох варіантів ідентична, різниця лише в деталях виконання окремих блоків (рис.1 правильно). Вихід фільтра – кватерніон  $q_t$ , що визначає обертання від розрахункової системи координат тіла датчика до земної координати рамка. Величина  $t$  використовується як індекс кроку часу. Реалізація кожного блоку з рис.2.1 (праворуч) описується наступним чином.

### **Динамічна зміна обертання (qDot)**

Перетворення даних гіроскопічної швидкості обертання в малу різницю обертання забезпечує блок динамічного обертання (qDot). Функцію також можна інтерпретувати як перетворення гіроскопічного вимірювання в обертовий кватерніон. Першим кроком є перетворення гіроскопічних даних у кути Ейлера (відповідно поворот, тангаж і крен) у системі

координат тіла:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \omega_t dt, \quad (2.8)$$

де  $d_t$  – частота дискретизації. Другим кроком є перетворення кутів Ейлера в кватерніон за допомогою

$$q_{dot,x} = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad q_{dot,y} = \sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad q_{dot,z} = \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right), \quad (2.9)$$

$$q_{dot,w} = \sqrt{1 - (q_{dot,x}^2 + q_{dot,y}^2 + q_{dot,z}^2)}, \quad (2.10)$$

де  $q_{dot}$  – обертання між системою координат тіла в момент часу  $t^{-1}$  і момент часу  $t$ .

Рівняння (2.9) і (2.10) використовуються в SCF. Завдяки малим кутам (швидка частота дискретизації) можна лінеаризувати функції синуса в (2.9) для використання в FSCF

$$\hat{q}_{dot} = 1 + \frac{\alpha}{2}i + \frac{\beta}{2}j + \frac{\gamma}{2}k. \quad (2.11)$$

В реальних умовах вплив цього наближення є незначним.

### **Інтеграція прогнозів ( $qPred$ )**

Прогнозування нової системи відліку позиції датчика на основі інформації від гіроскопа отримується інтегруванням обертання в SO(3), яке визначається множенням кватерніонів (2.6)

$$q_{pred} = \hat{q}_{t-1} \times q_{dot}, \quad (2.12)$$

де  $q_{pred}$  – кватерніон обертання від передбачуваної системи координат тіла до земної системи координат.

### **Еталонний вектор акселерометра ( $aRef, accPred$ )**

Якщо припустити, що виміряні вектори прискорення нормалізуються на початку кожного кроку фільтра (сенсори повинні бути відкалібровані перед вимірюванням, особливо магнітометр). Повектор відліку



акселерометра визначаємо частину земної системи координат. Опорний вектор можна встановити як

$$a_r = [0, 0, 1]^T, \quad (2.13)$$

що представляє нульове обертання, якщо гравітаційне прискорення спрямоване вниз уздовж осі 'z' системи відліку тіла.

Орієнтовний вектор у передбачуваній системі тіла можна отримати обертанням кватерніона за допомогою рівняння (2.5)

Однак для конкретного вибору еталонного вектора (2.13), та сама операція з використанням матриць обертання має нижчу обчислювальну вартість.

### Еталонний вектор магнітометра (*mRef*, *magPred*)

Вибір опорного вектора для магнітометра складніший. Через магнітні спотворення, вплив феромагнітних матеріалів у будівлях та зміну магнітного нахилу, не доцільно визначати магнітний опорний вектор константою.

Оригінальне посилання, запропоноване в [31] вимагає значних обчислювальних витрат. Тому запропоновано обчислювати відлік у системі відліку тіла замість системи відліку Землі. Щоб досягти цього, нам потрібно повернути акселерометр до рами тіла. Ми використовуємо прогнозоване значення акселерометра для придушення шуму вимірювання. Результатом є обчислювально дешевша альтернатива, оскільки її компоненти вже доступні:

$$\begin{aligned} m_{r,z} &= \cos(\hat{\phi}) = a_{pred,x}m_{t,x} + a_{pred,y}m_{t,y} + a_{pred,z}m_{t,z}, \\ m_{r,x} &= \sin(\hat{\phi}) = \sqrt{1 - m_{r,z}^2}, \\ m_r &= [m_{r,x}, 0, m_{r,z}]^T, \end{aligned} \quad (2.16)$$

є оцінкою поточного нахилу між прогнозованим акселерометром і вимірюванням магнітометром за допомогою (2.1). Ця формула є швидшою за обчисленнями, і експерименти показують, що вона має незначний вплив на точність отриманого фільтра.

Поворот опорного вектора до прогнозованої системи координат отримується аналогічно (2.15) як

$$m_{pred} = R^T m_r = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_y^2 + q_z^2) & 0 & 2q_x q_z - 2q_w q_y \\ 2q_x q_y - 2q_w q_z & 0 & 2q_y q_z + 2q_w q_x \\ 2q_x q_z + 2q_w q_y & 0 & 1 - 2(q_x^2 + q_y^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{r,x} \\ 0 \\ m_{r,z} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

### Відхилення прогнозу та вимірювання (*magDev*, *accDev*)

Якщо прогнозована система відліку правильна, прогнозовані значення еталонних векторів магнітометра та акселерометра повинні бути близькими до вимірних значень. Ми кількісно визначаємо відхилення вимірних векторів від еталонних векторів за кутом і напрямком. Наприклад, для акселерометра відхилення між вимірним вектором  $a_t$  і прогнозованим вектором  $a_{pred}$  обчислюється як

$$\alpha_a = \cos^{-1} \left( a_t^T a_{pred} \right), \quad a_{cor} = \frac{\text{cross} \left( a_t, a_{pred} \right)}{\| \text{cross} \left( a_t, a_{pred} \right) \|}, \quad (2.18)$$

де хрест визначено в (2.2). Такі ж операції виконуються для вимірювань  $m_t$  і еталонних векторів  $m_r$  магнітометра, кута текучості  $\alpha_m$  і  $m_{cor}$ . Ці операції реалізовані блоками «accDev» і «magDev» на рис.2.1.

### Визначення кроку корекції (*magCor*, *accCor*)

Відхилення вимірювання від прогнозу є індикатором, у якому напрямку ми повинні повернути прогнозовану систему координат, щоб отримати кращу оцінку. Ключовим компонентом фільтра є вибір впливу відхилення на корекцію прогнозованої системи координат. У нашому фільтрі ми пропонуємо поправку в напрямку векторів  $a_{cor}$  і  $m_{cor}$ , але зменшуємо масштаб поправки (кути  $\alpha_a$  і  $\alpha_m$ ) за допомогою функції поправки, наприклад,

$$\beta_a = f_{cor} (\alpha_a, \lambda_a), \quad (2.19)$$

для кута відхилення акселерометра. Тут  $\lambda_a$  позначає параметр налаштування. Вибір функції  $f_{cor}$  істотно впливає на результат. Ми перевіримо три основні функції корекції: (i) лінійна функція  $\beta_a = \lambda_a \alpha_a$  (відрізок нуля); (ii) стала функція  $\beta_a = \lambda_a$  (підхід Меджвіка); та (iii) сегментована функція як комбінація двох попередніх:  $\beta_a = \lambda_{a,1} \alpha_a$ , якщо  $\lambda_{a,1} \alpha_a < \lambda_{a,2}$ ,  $\beta_a = \lambda_{a,2}$  інакше. Найпоширенішим методом в інших фільтрах є крок лінійної корекції. Параметри  $\lambda_a$  і  $\lambda_m$  можна розглядати як вагові коефіцієнти корекції фільтра кожного датчика.

Корекція повороту від вимірювання акселерометра може бути сформульована у формі кватерніону (2.3) наступним чином:

$$q_{a,cor} = \left[ \cos \frac{\beta_a}{2}, a_{cor}^\top \sin \frac{\beta_a}{2} \right]. \quad (2.20)$$

Оскільки кут  $\beta_a$  зазвичай дуже малий, ми можемо наближено (2.20) шляхом лінеаризації

$$\tilde{q}_{a,cor} = \left[ 1, a_{cor}^\top \frac{\beta_a}{2} \right], \quad (2.21)$$

який використовується у спрощеному FSCF. Аналогічні рівняння використовуються для повороту в бік вимірювання магнітометра,  $q_{m,cor}$ .

Це не очевидно, але в його знаменитій статті [31], Madgwick представляє два фільтри з різною поведінкою. У його статті перший фільтр закінчується рівнянням (2.23). Корекція, що поширюється через градієнтний фільтр, призводить до класичної лінійної функції корекції. Цей фільтр позначається Лінійним Маджвіком. Другий фільтр у його статті заснований на синтезі за (2.29). У цій галузі вперше застосовано постійний крок корекції. Ми називаємо другий фільтр градієнтним фільтром Маджвіка.

Функція корекції реалізована в блоках «accCor» і «magCor» на рис.2.1. Якщо ми використовуємо постійний крок корекції, кут відхилення не включається в крок фільтра. Тоді ми можемо заощадити невелику кількість обчислювальної потужності, опустивши обчислення  $a_a$  та  $a_m$  у рівнянні (2.18) з попереднього блоку.

Зрозуміло, що для дуже малого відхилення кута постійний крок корекції призведе до перерегулювання і, таким чином, до ефекту зигзага. Цьому можна запобігти, використовуючи сегментовану функцію. Порівняння ефекту перевірених корекційних функцій наведено в експериментальній частині.

### **Злиття корекційних кватерніонів (*fuseCor*)**

Етап злиття має на меті створити єдиний кватерніон, який представляє поправку передбачуваної системи відліку щодо вимірювань. У евклідовому просторі це часто досягається опуклою комбінацією. Еквівалентна операція в просторі обертання може бути отримана чисельно шляхом повторення застосування нескінченно малих кроків поперемінного обертання до першого та другого вимірювання. Оскільки це обчислювально

дорога операція, найпоширенішим наближенням цієї операції є застосування обертального множення злитих кватерніонів [39], що відповідає грубому наближенню правильного кроку. Однак це просте наближення не зберігається комутативність і її точність швидко зменшуються зі збільшенням кутів і різниці в напрямках злитих кватерніонів.

В якості альтернативи ми пропонуємо просту аналітичну формулу, яка наближає числове рішення. Ми пропонуємо триетапне наближення. Спочатку створіть опуклу комбінацію векторів  $a_{cor}$  і  $m_{cor}$

$$f_{cor} = \left( \frac{\beta_a}{2} a_{cor} + \frac{\beta_m}{2} m_{cor} \right), \quad (2.22)$$

використовуючи вагові коефіцієнти  $\beta_a$  і  $\beta_m$ . По-друге, обчисліть його кривизну на гіперсфері

$$c = \text{sinc}(\text{norm}(f_{cor})), \quad (2.23)$$

де  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$  — ненормалізована функція sinc. По-третє, генеруйте кватерніон

$$q_{cor} = \left[ \sqrt{1 - f_{cor}^\top f_{cor} c^2}, f_{cor} c \right], \quad (2.24)$$

який є останнім кватерніоном корекції. Для малих поворотів кривина  $c$  наближається до одиниці, що дозволяє спростити (2.24) для FSCF:

$$\tilde{q}_{cor} = [1, f_{cor}], \quad (2.25)$$

Точність запропонованої формули перевірялася в порівнянні з чисельним рішенням з використанням мільярда кроків для кожного обертання тестування. На рис.2.2 для збільшення значення кута повороту наведено в додатку А.

Зауважимо, що запропонована Формула (2.24) є точним для всього перевіреного інтервалу кутів повороту. Спрощена формула точна для низьких значень кута повороту, але погіршується понад 30 градусів. Зазвичай використовуваний метод множення кватерніонів є найменш точним у цьому випадку.

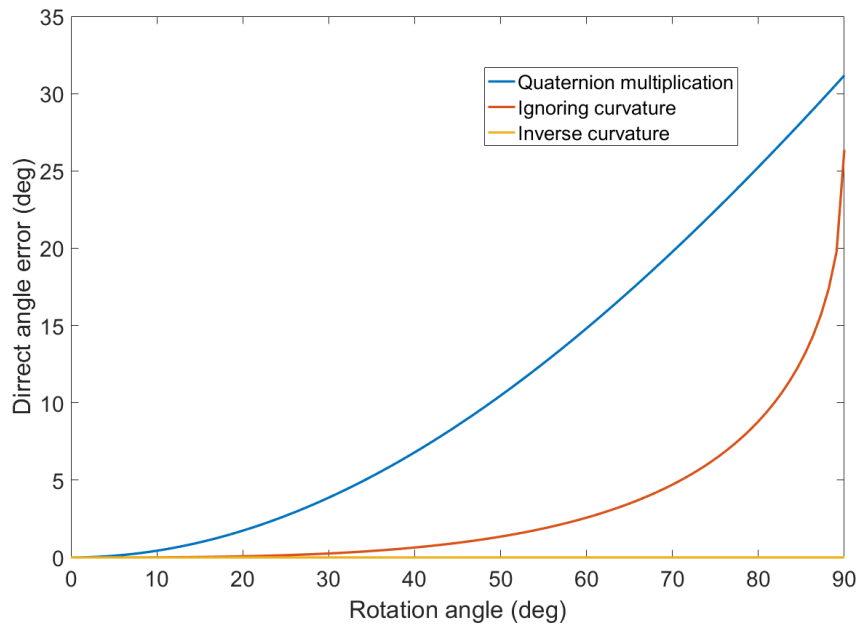


Рисунок 2.2 – Точність злиття кватерніонів двох обертів перпендикулярних напрямків з однаковим значенням кута повороту для кватерніонного множення (синій), запропонований метод з оберненою квадратурою (2.24) (жовтий) і спрощений метод (2.25), ігноруючи кривизну (червоний)

### Застосування кроку корекції

Останній блок фільтра «правильно» застосовує крок корекції до передбачення шляхом множення кватерніонів як

$$\hat{q}_t = q_{pred} \times q_{cor}. \quad (2.26)$$

Фільтр FSCF містить кілька наближень математично коректних операцій  $SO(3)$ , (2.11), (2.21), і (2.25). Нормалізація оціненого кватерніона повинна виконуватися після кожного кроку фільтра. Це настійно рекомендується також для SCF через числову інтеграцію помилок.

## 2.2 Експериментальні дослідження

Порівняння точності фільтрів AHRS є проблематичним завданням, оскільки кожен фільтр має різну поведінку в різних ситуаціях. Тому ми підготували експериментальну платформу та записали три різні набори даних з різними характеристиками.

Ми оцінювали продуктивність фільтрів у два етапи. Спочатку ми обчислили обертання між основним істинним кватерніоном і оціненим

кватерніоном

$$q_{dif} = q_{gt} \times q_{est}^{-1}. \quad (2.27)$$

По-друге, ми оцінили кут повороту різниці  $\theta(q_{div}, f)$ , використовуючи (2.7) на кожному часовому етапі експерименту. Точність оцінки оцінювали за допомогою двох загальних показників, середньої абсолютної помилки (MAE) і середньої квадратичної помилки (RMSE) кута повороту  $\theta(q_{div}, f)$ . Ми використовували MAE для графічних презентацій, оскільки він відрізняється великим діапазоном помилок.

Щоб мінімізувати ймовірність появи помилки в реалізації, ми віддаємо перевагу порівнянню якості нашого фільтра з методами, опублікованими з реалізованим кодом. Тому ми обрали комплементарний фільтр Маджвіка [31], додатковий фільтр Валенті [38], і Го постФільтр Калмана [36]. Однак жоден із нещодавно опублікованих фільтрів із незалежними корекціями від магнітометра та акселерометра не мав доступного коду. Тому ми порівняли методи з нашою реалізацією фільтра Су [36].

Експериментальна платформа складалася з трьох перпендикулярних стрижнів довжиною 36 см для отримання кращої точності локалізації (рис.2.3). Платформа була оснащена недорогим сенсорним блоком BMX055 від BOSCH Sensortec і блоком nrf2411s, налаштованим як бездротовий трансивер. Дані були отримані другим блоком nrf2411s, який працював як бездротовий приймач, підключений до Arduino UNO, де вони змішувалися та реєструвалися з даними, що надходять від системи оптичного позиціонування VICON-460. Точність позиціонування досліджувалась у [37, 38], що підтверджує субміліметрову точність вимірювань положення залежно від умов експлуатації. Оскільки навіть найгірша похибка в 1 мм у положенні стрижня означає похибку в 0,16 градуса при його обертанні, ми вважали це вимірювання основним джерелом істинності для протестованих фільтрів.

У лабораторії було проведено три експерименти, щоб зафіксувати різні сценарії, які можуть виникнути на практиці. Перший експеримент був розроблений, щоб містити відносно повільні обертання, тоді як другий експеримент був розроблений, щоб містити швидкі обертання. У третьому експерименті обертання гальмується, але платформа піддається динамічним прискоренням у різних напрямках. Набори даних, записані в кожному експерименті, були синтетично пов'язані для створення трьох різних сценаріїв. Перший сценарій представляє сприятливі умови, коли присутні лише повільні оберти, тому використовується лише набір даних із першого експерименту.



Цей сценарій є поширеним, наприклад, у застосуваннях безпілотників у приміщеннях. Другий сценарій представляє більш складні умови, де поширені як повільні, так і швидкі обертання, як, наприклад, у додатках віртуальної реальності. Цей сценарій отримано шляхом об'єднання наборів даних з перших двох експериментів. Третій сценарій — це найсуворіші умови, коли обертання порушується різкими прискореннями з довільних напрямків, як це виникає в інерційних системах захоплення руху. Це отримано шляхом об'єднання даних усіх трьох експериментів. Дані з усіх трьох наборів даних відображені на рис.2.3 та наведено в додатку А.

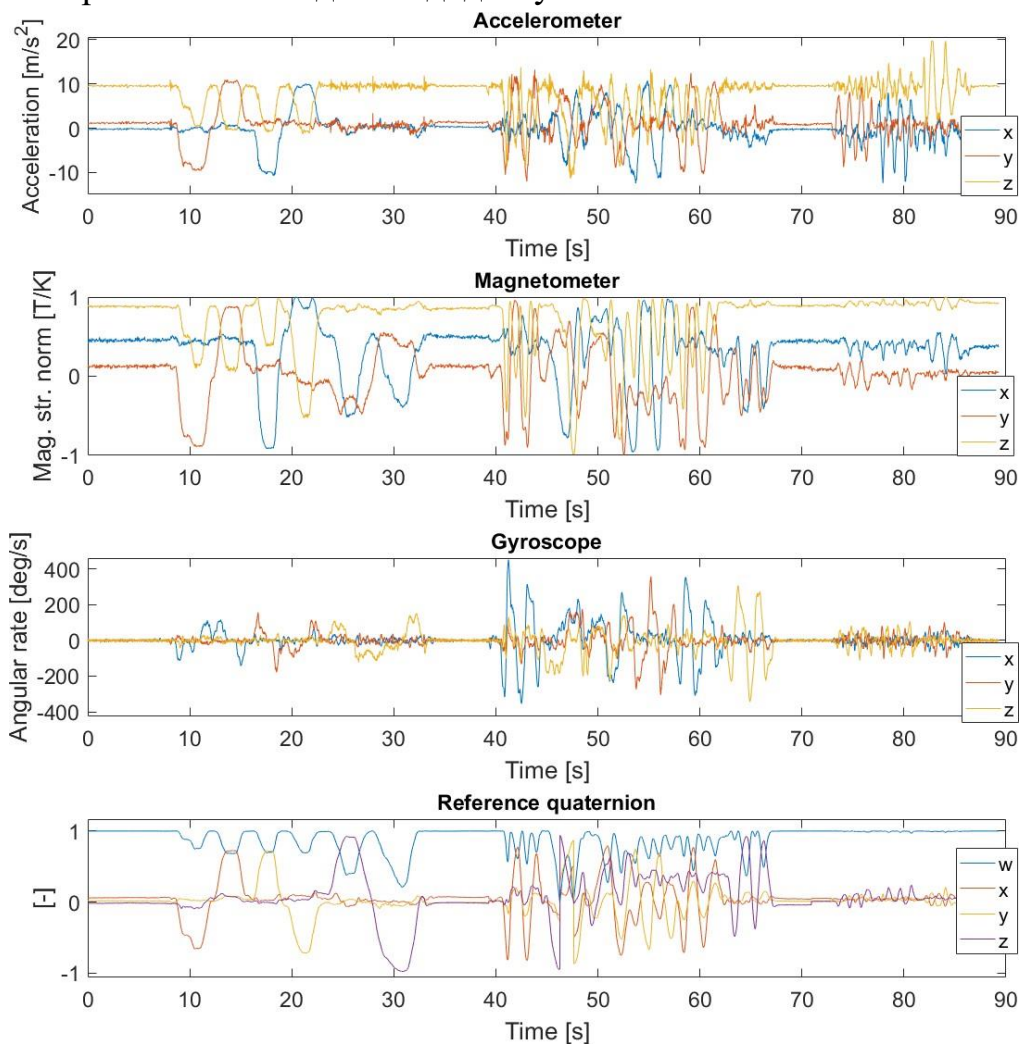


Рисунок 2.3 – Виміряні дані з усіх трьох експериментів. Перші три рядки відображають дані з Датчик MARG: усі три осі, x, y, z, акселерометра, магнітометра та гіроскопа відповідно. Виміряні позиції точок на платформі з системи VICON були перетворені в еталонний кватерніон, який відображається через компоненти вектора, w, x, y, z

### Налаштування параметрів фільтра

Налаштування параметрів фільтра має важливе значення для належної оцінки їх продуктивності [31]. Тому ми оптимізували параметри

налаштування всіх фільтрів для кожного сценарію та кожного показника продуктивності (MAE, RMSE) незалежно. Оскільки задача неопукла, нам знадобилася глобальна метод оптимізації. З цієї причини багато авторів використовують стохастичний пошук, такий як оптимізація роєм частинок [32], який може бути важко відтворити. Тому ми досліджували детерміновані методи оптимізації. Звичайний симплексний пошук Нелдера–Міда, реалізований у Matlab, виявився ненадійним. Тому ми розробили нашу версію покращеного пошуку по сітці [33]. Зокрема, ми почали з початкового припущення та розробили сітку значень, що складається зі значень початкового припущення, помножених на попередньо визначені коефіцієнти. Дивіться додатковий матеріал для деталей реалізації.

### **Вплив функції корекції**

Ідея корекції в основній формі була запропонована в [34] і розроблено в більш досконалому вигляді в запропонованій методиці. Було виявлено, що це дуже важливий фактор для точності різних фільтрів, як показано в цьому розділі. Щоб отримати справедливі умови тестування, параметри всіх протестованих фільтрів були оптимізовані для кожного тесту та кожного фільтра, щоб отримати найкращу можливу відповідь. Помилки фільтрів досить шумні в необробленому форматі, тому ми представляємо їх обробленими фільтром ковзного середнього з розміром вікна 40 вибірок для кращої читабельності (частота дискретизації близько 100 Гц).

### **Функція корекції у фільтрах Маджвіка**

Основний фільтр представлений у [34] використовує лінійну функцію та позначатиметься як Лінійний Маджвік. Проте основні результати, представлені в [34] використовують функцію постійної корекції та позначатимуться як Маджвік у нашому порівнянні. Різниця між цими двома версіями показана на рисунку 2.4 за даними першого сценарію. Версія з функцією постійної корекції перевершує лінійний фільтр на 58%. Відтепер для тестів буде використовуватися лише версія фільтра з функцією постійної корекції.

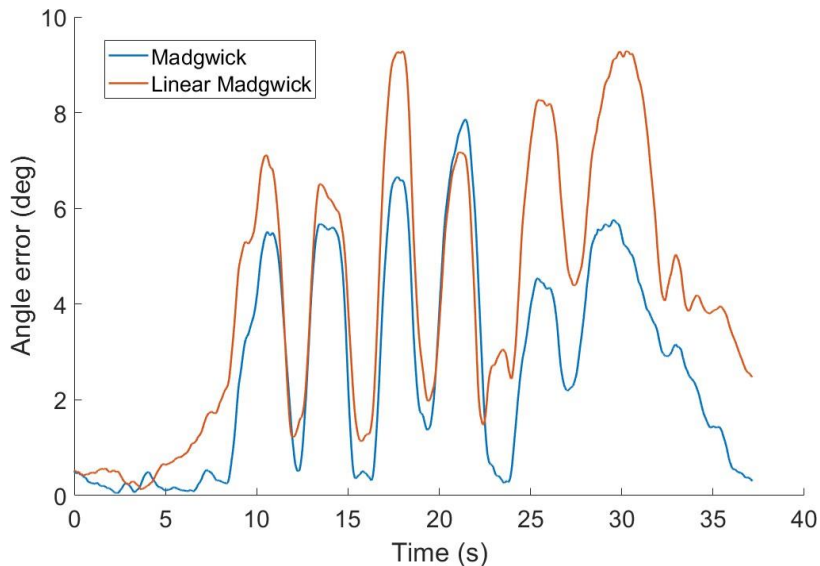


Рисунок 2.4 – Порівняння точності фільтрів Маджвіка для двох варіантів функції корекції надані з першого сценарію. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності

### Функція корекції в SCF

Три форми функції корекції, запропоновані вище були перевірені: (i) лінійна функція, яка має лише один параметр на коригуючий датчик; (ii) постійна функція також з одним параметром на датчик; (iii) сегментована функція з двома параметрами на датчик корекції. Щоб зменшити кількість параметрів у сегментованій функції, ми налаштували єдине посилення лінійної частини для обох датчиків. Це призводить до фільтра з трьома параметрами для налаштування.

Параметри всіх коригувальних функцій були оптимізовані для продуктивності за сценарієм 3, і результати відображені на рисунку 2.6. Результат показує, що майже немає різниці в точності фільтра з функцією постійної корекції та його теоретично вдосконаленої версії, сегментованої функції. Зверніть увагу, що похибка фільтра з функцією лінійної корекції значно зростає між 23 і 36 с (частина зміни курсу, рис. 2.5). Інша істотна відмінність також полягає в порушеннях прискорення. Вплив функції корекції при швидких обертаннях видається незначним. У цій частині в похибці переважає пік між 60 і 70 с, який може бути викликаний десинхронізацією між еталонними та вимірними даними.

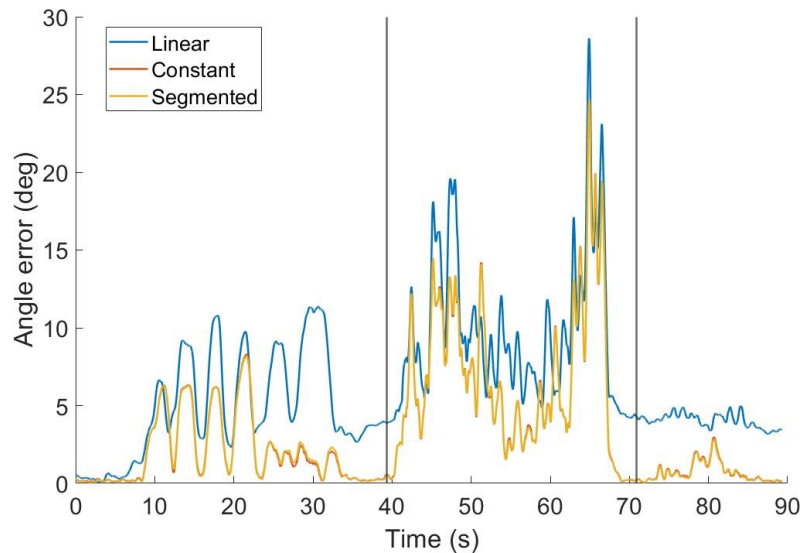


Рисунок 2.5 – Точність розділеного коригувального фільтра (SCF) для сценарію 3 і три різні варіанти функції коригування: лінійна, постійна та сегментована. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності

Середня похибка зведена в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння запропонованого фільтра з різними формами функції корекції

ShapeMAE	Помилка (град)
Лінійний	5.19
Постійний	<b>3.37</b>
Сегментований	<b>3.37</b>

Зауважте, що вплив сегментованої функції на помилку низький, але налаштування додаткового параметра складне. Тому в наступних тестах була використана функція сталої корекції.

### Порівняння вибраних сценаріїв застосування

Продуктивність протестованих фільтрів оцінювалася для всіх трьох сценаріїв, визначених вище. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для кожного сценарію незалежно для отримання найнижчого середнього MAE або RMSE. Оскільки SCF і FSCF мають майже однакову поведінку, лише результати FSCF відображаються на рис.2.6-2.8. Оскільки результати фільтра Суха [36] були значно гіршими за інші фільтри в наборі для тестування, його оцінки відображаються прозоро для кращої читабельності результатів інших фільтрів. Результати для першого сценарію лише з повільним обертанням показано на рис.2.6 і зведено в табл.2.2 та наведено в додатку А.

Продуктивність усіх фільтрів порівнянна в першій половині набору даних, але відрізняється в другій, де запропонований фільтр має найменшу похибку.

Таблиця 2.2 – Помилки оцінки перевірених фільтрів для всіх перевірених сценаріїв. Параметри всіх фільтрів були оптимізовані для найкращої продуктивності

Тип фільтра	MAE [град]			RMSE [град]		
	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Маджвік	2,65	4,65	3,91	3,47	6,51	5,82
Валенті	2,74	5,93	4,53	3,85	7,17	6,41
Сух	5,39	10,59	11,43	6,41	15,12	15,62
Го	2,61	4,41	3,95	3,51	6,42	5,79
SCF	<b>1,96</b>	<b>4,05</b>	<b>3,35</b>	<b>3,02</b>	<b>6,25</b>	<b>5,6</b>
FSCF	<b>1,96</b>	<b>4,05</b>	<b>3,35</b>	<b>3,02</b>	<b>6,25</b>	<b>5,6</b>

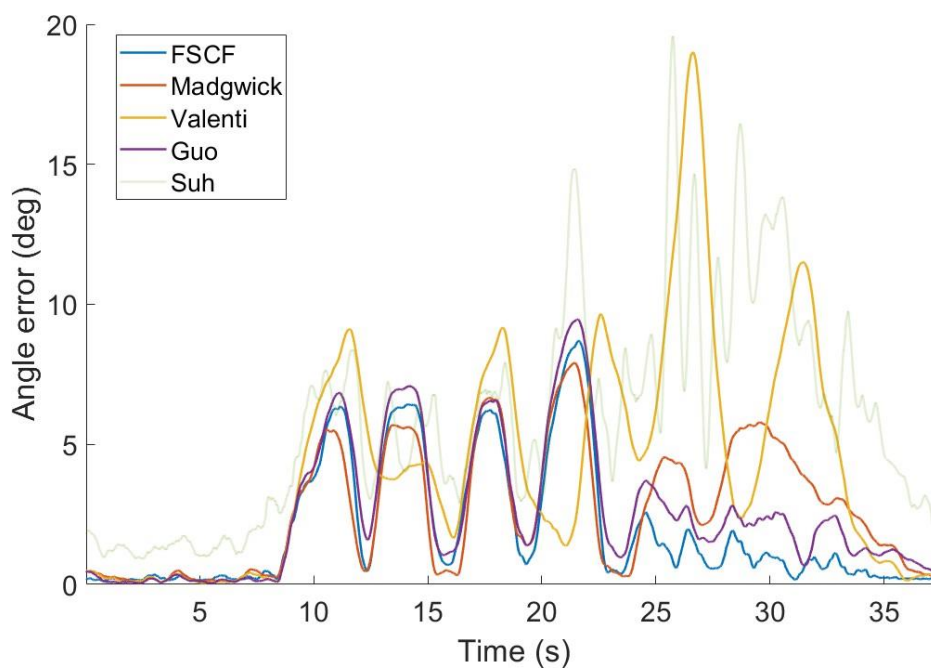


Рисунок 2.6 – Помилка перевірених фільтрів для даних з першого сценарію. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності (сценарій 3)

Другий сценарій містить як повільне, так і швидке обертання. Результати зведені в табл.2.2 і детально показано на рис.2.7. Зверніть увагу, що похибка під час швидких обертань (40–70 с) набагато вища, ніж для повільних обертань, і домінує пік між 60–70 с. Цей пік також можна пояснити відхиленням у еталонних даних VICON. Однак, оскільки всі фільтри мають майже однакову продуктивність у цьому регіоні, це не впливає на результати порівняння. Фільтри були налаштовані для найкращих загальних результатів у цьому сценарії, але продуктивність у першій частині (повільне обертання) подібна до результатів із параметрами, налаштованими лише для першого сценарію.

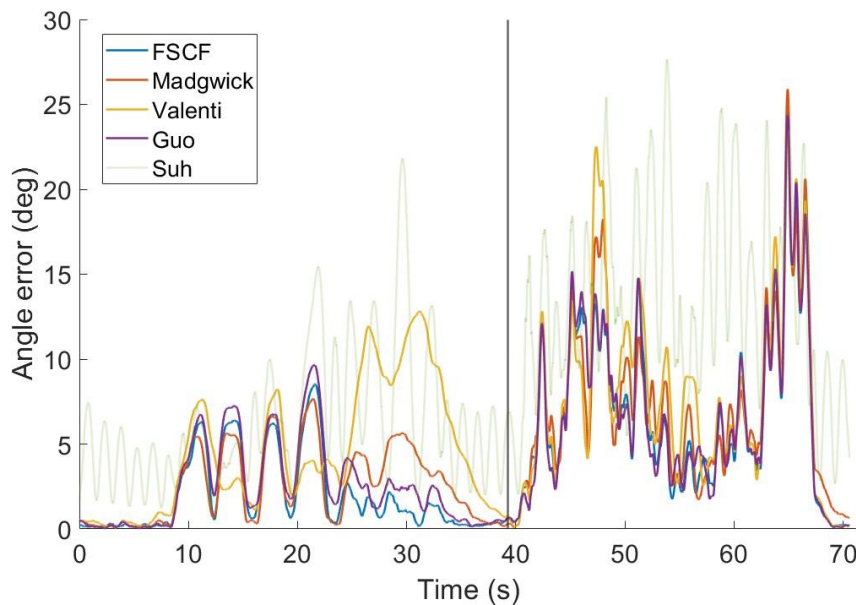


Рисунок 2.7 – Помилка перевірених фільтрів для даних другого сценарію. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності (сценарій 3)

Останній сценарій доповнює повільне та швидке обертання послідовністю динамічних прискорень для перевірки стійкості до перешкод. І знову всі фільтри були налаштовані на найкращу загальну продуктивність у всьому наборі даних. Результати зведені в табл. 2.2 і детально проаналізовано на рис.2.8. Відзначимо, що запропонований фільтр значно кращий за конкурентів у другій частині повільного обертання даних і в даних динамічного прискорення. У всіх інших випадках він порівнянний з найкращим з інших фільтрів.



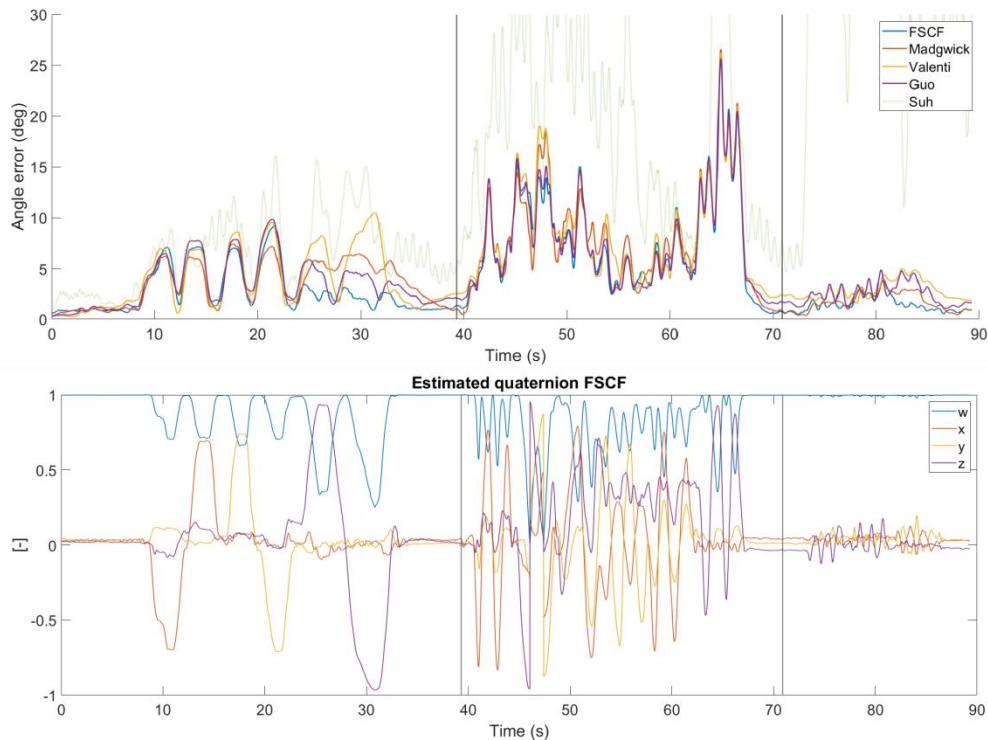


Рисунок 2.8 – Помилка всіх протестованих фільтрів для даних третього сценарію (верхній ряд): повільні оберти (ліворуч), швидкі оберти (посередині) і динамічне прискорення (праворуч). Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності. Кватерніон, оцінений коригуючим фільтром швидкого розділення (FSCF), відображається для ілюстрації (нижній рядок)

### Перехресна перевірка дослідження

Попередні експерименти були оптимізовані для найкращої продуктивності, щоб отримати теоретичну нижню межу. У цьому розділі ми представляємо результати нашого дослідження чутливості всіх протестованих методів до налаштування їхніх параметрів. Ми провели дослідження перехресної перевірки, під час якого ми навчили параметри методів на одній частині даних і звітували про їх ефективність на решті даних. Зокрема, представлений набір даних складається з окремих частин: (i) повільне обертання 0–40 с, які утворюють сценарій 1, (ii) швидкі обертання 40–72 с, (iii) динамічні прискорення через 72 с. Оскільки налаштування параметра на динамічне прискорення забезпечить вироджену поведінку (правильний результат завжди дорівнює нулю), ми оптимізуємо параметри всіх методів лише на одній із швидких або повільних частин і оцінюємо їх продуктивність на решті частини набору даних, таблиця 2.3. Найкраща продуктивність досягається для запропонованого методу, а потім

оригінального фільтра Маджвіка. Це вигідна властивість відсікання градієнта, яка не чутлива до абсолютного значення помилки. Параметри всіх методів були навчені на повільній або швидкій частині набору даних. Повідомлена точність вимірюється на основі даних тестування, які є частиною набору даних, що залишилася.

Таблиця 2.3 – Точність перевірених методів на наборі даних тестування

Тип фільтра	MAE[град]RMSE		[градус]	
	Навчався на Fast	Тренувався на Slow	Навчався на Fast	Тренувався на Slow
Меджвік	3.32	5.67	4.24	7,76
Валенті	4.85	13.93	5,83	15.53
Сух	24.25	34.18	42.29	48.21
Го	3.41	6.72	4.15	8.48
SCF	<b>3.22</b>	<b>5.30</b>	<b>3.89</b>	<b>7.49</b>
FSCF	<b>3.22</b>	<b>5.30</b>	<b>3.89</b>	<b>7.49</b>

### Обчислювальні витрати

Обчислювальна вартість є важливим фактором для вбудованих систем, що містять комбінацію датчиків MARG. Обробка потоку даних у реальному часі є найпоширенішим завданням для фільтрів AHRS. Швидкість фільтрів можна порівняти за кількістю операцій із плаваючою комою за один крок фільтра. Результати для всіх перевірених методів наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 –Обчислювальна вартість для кожного фільтра в термінах операцій із плаваючою комою

Фільтр	FLOPs
Меджвік	287
Валенті	244
Сух	352
Го	1000
SCF	179
FSCF	160

Час обчислення фільтрів типу Маджвіка можна додатково скоротити, використовуючи прийоми реалізації [23] або спрощення проблеми [25]. Поки [35] досягає майже такої ж точності, як [33], спрощення, представлене в [34] негативно впливає на точність, у нашому випадку збільшення MAE на 57%

порівняно з [36] у сценарії 3.

### **Короткий зміст експериментальної частини**

Перевага від використання правильних математичних операцій у  $SO(3)$  виявилася незначною вплив на продуктивність фільтра. Зокрема, вдосконалення запропонованого методу злиття кватерніонів порівняно з множенням кватерніонів (рис.2.2) становив 0,3‰ для методу без урахування обертання кривизни та 0,4‰ для методу з оберненою кривизною. Однак це може стати більш важливим у додатках із меншою частотою дискретизації.

Більш важливим фактором ефективності фільтра є вибір функції корекції, як описано вище. Постійний крок корекції виявився хорошим вибором для стандартних застосувань із комбінацією датчиків MARG. Методи, які використовують функцію корекції (наприклад, постійний крок корекції), також менш чутливі до параметрів налаштування та добре працюють у дослідженні перехресної перевірки.

Однак основним внеском у хорошу продуктивність запропонованого фільтра є застосування функції корекції незалежно від даних акселерометра та магнітометра перед їх об'єднанням. У наших тестах оптимальна вага магнітометра була приблизно в 10 разів меншою, ніж вага акселерометра. Це вказує на те, що фільтри зі спільною вагою як для акселерометра, так і для магнітометра є неоптимальними в реальних програмах.

Запропоновані фільтри виявилися більш точними, ніж будь-які з його конкурентів у всіх тестах. Зокрема, середня абсолютна похибка запропонованого фільтра становила 77% від другого найкращого фільтра в сценарії 1 (повільне обертання), 93% від другого найкращого в сценарії 2 (повільне та швидке обертання) і 86% у сценарії 3 (повільне і швидке обертання, динамічне прискорення).

Найбільшою перевагою запропонованого фільтра є його точність для більш повільних обертів і динамічних прискорень. Тим не менш, покращення для швидшого обертання також є значним.

### **2.3 Висновки до розділу**

Запропоновано новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для магнітометра та акселерометра (SCF) та його швидшу версію (FSCF). Обидва фільтри мають нижчу обчислювальну вартість, ніж інші добре відомі методи в цій галузі. Хоча обидва фільтри мають прості структури, було продемонстровано, що вони більш точні, ніж їхні конкуренти. Найбільш помітне покращення спостерігалось в сценарії з

повільними обертаннями (77% середня абсолютна похибка другого найкращого фільтра), але воно покращує динамічне прискорення, а також швидкі обертання. Ключовою відмінністю від попередніх підходів є застосування функції корекції незалежно до даних акселерометра та магнітометра перед їх злиттям. Це відкриває можливості для майбутніх досліджень, наприклад, он-лайн адаптації ваг.

### 3 КОМПЕНСАЦІЯ КУТА НАХИЛУ ДЛЯ МЕТОДУ СИНХРОННОГО ЗБОРУ ДАНИХ НА ОСНОВІ ДАТЧИКА MEMS

Кварцовий вібраційний акселерометр (QVBA) як новий тип мікроелектромеханічних систем (MEMS) інерційного датчика широко використовується в інтелектуальних роботах-підмільних машинах, малих літальних апаратах, навігаційних системах тощо. Для цих застосувань коригування та компенсація положення Кут із результатом прискорення відіграє важливу роль для підвищення точності вимірювання. Помилка синхронізації між вимірюванням кута орієнтації акселерометра та гіроскопа негативно впливає на точність кута орієнтації. У цій статті запропоновано схему синхронного збору даних акселерометра та кута орієнтації гіроскопа в безплатформній інерціальній навігаційній системі (SINS). У той же час, щоб підвищити точність вибірки та швидкість перетворення QVBA, у цьому документі також реалізовано вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності. Для прискорення обчислень використовується апаратний блок з плаваючою комою (FPU). значення вимірювання частоти. Довготривала кумулятивна похибка значення вимірювання частоти менше 10<sup>-4</sup>. Час процесу розрахунку від вибірки до розрахунку компенсації кута кута нахилу скорочується на 40,8%.

#### 3.1 Підгрунття для створення методу та системи компенсації кута нахилу для роботизованих систем

З розвитком технології мікроелектромеханічних систем (MEMS) кварцові вібраційні променеві акселерометри (QVBA), новий тип інерційного датчика MEMS із повним цифровим імпульсним виходом, привертають все більшу увагу в малих літаках, роботах, навігаційних системах, системи доповненої реальності тощо завдяки перевагам високої точності, малого розміру та низької вартості [37]. У безплатформній інерціальній навігаційній системі (SINS) QVBA в основному використовуються для вимірювання лінійного прискорення тіла. Через хороші статичні характеристики значення прискорення можна точно виміряти в статичному стані. Однак під час польоту вони чутливі до температури шум через погані динамічні характеристики. Щоб вирішити проблему точності вимірювання акселерометром, у багатьох високоточних інерціальних навігаційних системах використовується безплатформний механізм із інтеграцією акселерометра та гіроскопа. У цих безрамкових інерціальних навігаційних системах для вимірювання кутової швидкості

обертання використовується гіроскоп із хорошими характеристиками відстеження та хорошими характеристиками динамічного відгуку, що компенсує недолік акселерометра. Потім, об'єднавши ці два види даних, можна отримати високоточний кут огляду.

Однак ці безрамні механізми створюють нові проблеми щодо того, як інтегрувати дані акселерометра та гіроскопа для досягнення високої точності орієнтації. Багато найсучасніших досліджень вирішують цю проблему з точки зору оптимізації алгоритмів об'єднання даних. У [38, 39], фільтр Калмана використовувався для злиття даних акселерометра та гіроскопа, і на цій основі була виправлена помилка випадкового дрейфу вихідної кутової швидкості гіроскопа, щоб покращити точність орієнтації літака. Оскільки фільтр Калмана можна використовувати лише в лінійній системі під шумом гаусового білого шуму, [40] запропонував розширений фільтр Калмана (EKF), який розширює теорію фільтра Калмана в нелінійному полі. У [41, 42], EKF було прийнято як злитий алгоритм оцінки ставлення, але лише у слабкій нелінійній системі. У посил. [43], новий змішаний фільтр Калмана на основі розширеного фільтра Калмана без запаху був розроблений для оцінки кутів орієнтації за допомогою датчика, вбудованого в снаряд. У [44, 45], фільтр частинок використовувався як алгоритм оцінки орієнтації, який вирішив обмеження нелінійного та небілого шуму систем і покращив точність фільтрації. Однак фільтр частинок також має велике навантаження на обчислення і не підходить для недорогої навігаційної системи, тому в роботах [46, 47], алгоритми комплементарного фільтру в кутах Ейлера та напрямних косинусах були наведені відповідно. У роботах [48, 49], було представлено додатковий фільтр на основі методу кватерніонів, який зменшив обчислювальну складність рішення щодо орієнтації та підвищив ефективність і точність. Прості, але практичні лінійні комплементарні фільтри успішно використовуються в практичних застосуваннях. Наприклад, авторами [50] запропоновано використання малі обертальні рухи, де кутова швидкість використовувалася для доповнення векторних вимірювань для підвищення точності оцінки за допомогою відповідної фільтрації. У посил. [51] запропоновано методику оцінки кутової швидкості твердого тіла за одновекторними вимірюваннями. Він не використовував інформацію про положення або швидкість гіроскопів як вхідні дані. Замість цього векторні вимірювання фільтрувалися безпосередньо через нелінійний спостерігач, який оцінював кутову швидкість. Euston та ін. [52] представив нелінійний додатковий фільтр на основі кватерніонів для оцінки положення безпілотного літального апарату (БПЛА) за результатами вимірювань від недорогого IMU. Фільтр був доповнений моделлю першого порядку динаміки автомобіля для компенсації зовнішнього доцентрового



прискорення. У застосуваннях БПЛА використання додаткових фільтрів [53-55] часто надають перевагу EKF, оскільки EKF може бути складним для реалізації, а збіжність відбувається повільніше через час, необхідний для ітерацій лінійної регресії.

Будучи важливим процесом SINS, оптимізація алгоритмів синтезу може гарантувати вищу точність орієнтації в принципі. Однак простого вдосконалення алгоритмів синтезу недостатньо для досягнення оптимального результату. Це пояснюється тим, що незалежно від алгоритму синтезу, ступінь синхронізації між вимірюванням прискорення та кутом орієнтації гіроскопа має дуже серйозний вплив на точність компенсації та корекції, таким чином впливаючи на точність орієнтації. Однак у поточному SINS акселерометр і гіроскоп працюють незалежно на відповідних частотах дискретизації. Між ними існує певний ступінь асинхронності, що призводить до певної помилки, тому асинхронне отримання спричинить велику сукупну помилку. Це має негативний вплив на точність кінцевого розрахованого кута огляду і навіть призводить до того, що дані будуть неточними. Отже, отримання синхронізації також необхідно для підвищення точності кута орієнтації. Однак, наскільки нам відомо, жодна робота не розглядає проблеми синхронізації акселерометра та гіроскопа.

Крім того, в SINS точність самих інерційних інструментів, таких як акселерометр і гіроскоп, є основою точності системи. Існують деякі останні роботи, які намагаються підвищити точність інерційних інструментів. У роботі [56] досліджено структурний процес і технологію обробки приладу для підвищення точності вимірювання приладу та точності інерціальної навігаційної системи. Оскільки цей метод був виконаний апаратно, це збільшує загальну вартість. У роботі [57], інструмент або система вже тестувалися та моделювалися раніше фактичне застосування, таким чином точність приладу була покращена за рахунок компенсації похибок. Цей метод не потребував додаткових витрат на обладнання. Однак це не підходило для виправлення динамічно змінюваного сигналу помилки.

Щоб вирішити вищевказані проблеми SINS, у цій статті ми пропонуємо новий метод, спрямований на забезпечення більш точного кута огляду з низькою вартістю та високою ефективністю. Ця стаття робить два основні внески:

По-перше, ми пропонуємо механізм синхронного збору даних, який синхронізує вибірку сигнали акселерометрів і гіроскопів. Ключова ідея нашого дизайну полягає в тому, щоб синхронізувати роботу акселерометра та гіроскопа перед виконанням алгоритму синтезу. Цей метод усуває асинхронну помилку, спричинену незалежною роботою акселерометра та гіроскопа на

відповідних частотах дискретизації. На цій основі два типи даних об'єднуються комплементарним алгоритмом фільтрації на основі методу кватерніонів, представленого у роботі [58], так що кут нахилу коригується та компенсується під час зміни прискорення, що ефективно покращує точність вимірювання.

Другий головний внесок статті полягає в тому, щоб запропонувати вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності для вимірювання частоти акселерометра з високою точністю, що покращує точність вимірювання з точки зору самого акселерометра.

Крім того, щоб покращити швидкість перетворення кварцового акселерометра з вібраційним променем, ми запровадили апаратний FPU для прискорення вимірювання частоти.

### 3.2 Побудова системи компенсації кута нахилу

У цьому розділі ми спочатку ознайомимося з принципом роботи QVBA. Потім ми проілюструємо технологію рівноточного вимірювання частоти. Після цього ми опишемо архітектуру SINS. Насамкінець окреслимо мотиви нашої роботи.

#### **Принцип роботи QVBA**

QVBA [57] — це новий вид високоточного твердотільного датчика на основі сили-частотихарактеристики кварцового вібраційного променя. Він заснований на п'єзоелектричному ефекті і частотно-силовій характеристиці кварцового резонатора. Його внутрішнє змінне електричне поле змушує дві двотактні встановлені кварцові балки вібрувати в режимі розтягування. Коли акселерометр піддається зовнішньому прискоренню, чутлива маса генерує одну силу інерції, щоб діяти на ці два кварцові пучки відповідно. Один з кварцових пучків піддається тиску, і його резонансна частота зменшиться; в той час як на інший діє сила розтягування, його резонансна частота зростатиме. Різниця частот останніх двох кварцових променів пропорційна зовнішній прикладеній силі, тобто пропорційна прискоренню, а потім вимірюється значення прискорення [58]. Відповідно, точність вимірювання частоти безпосередньо відображає точність вимірювання прискорення.

Як згадувалося вище, кожен акселерометр буде виводити два сигнали частоти. Різницю між цими двома частотними сигналами та її співвідношення з прискоренням можна обчислити таким чином:

$$f_1 - f_2 = L_1(L_0 + a + L_2a^2), \quad (3.1)$$

$L_0$  – значення зміщення нуля,  $L_1$  – масштабний коефіцієнт, а  $L_2$  – нелінійний коефіцієнт другого порядку.  $f_1$  і  $f_2$  позначають вихідний сигнал чутливого кварцового променя,  $F_1$  і  $F_2$  відповідно, одиниця вимірювання — Гц, а позначає безпосереднє прискорення, одиниця — g.

### **Рівноточний метод вимірювання частоти**

Зазвичай використовуються методи вимірювання частоти: періодичне вимірювання частоти, пряме вимірювання частоти та вимірювання частоти рівної точності. Метод періодичного вимірювання частоти отримує частоту шляхом підрахунку імпульсів сигналу стандартної частоти в межах одного циклу сигналу, що підлягає вимірюванню. Метод прямого вимірювання частоти отримує частоту шляхом підрахунку імпульсів сигналу, який потрібно виміряти протягом заданого часу стробування [57, 59]. Перевага цих двох методів полягає в тому, що принцип простий і легкий у реалізації. Однак у процесі вимірювання цими двома методами помилки підрахунку неминучі через їхні принципи підрахунку, а точність вимірювання змінюється залежно від частоти вимірюваного сигналу. Завдяки аналізу помилок метод періодичного вимірювання частоти підходить для вимірювання низькочастотних сигналів, а метод прямого вимірювання частоти підходить для вимірювання високочастотних сигналів. Жоден з них не може забезпечити точність вимірювання як високочастотних, так і низькочастотних сигналів. На відміну від попередніх двох методів, точність вимірювання методу вимірювання частоти рівної точності не залежить від частоти вимірюваного сигналу. Він не тільки забезпечує високу точність вимірювань.

### **Архітектура безрамкової інерціальної навігаційної системи**

SINS - це безкаркасна система, яка складається з трьох акселерометрів, трьох гіроскопів і мікрокомп'ютера. На рис.3.1 показана принципова схема типового БНС. У цій системі акселерометри та гіроскопи встановлюються безпосередньо на носій для вимірювання прискорення та кутової швидкості відповідно. Мікрокомп'ютер використовується для розрахунку матриці положень у реальному часі. Таким чином, інформація акселерометра системи координат несучої перетворюється в інформацію в навігаційній системі координат. На цій основі виконується навігаційний розрахунок і, нарешті, отримується інформація про швидкість, положення та положення носія.

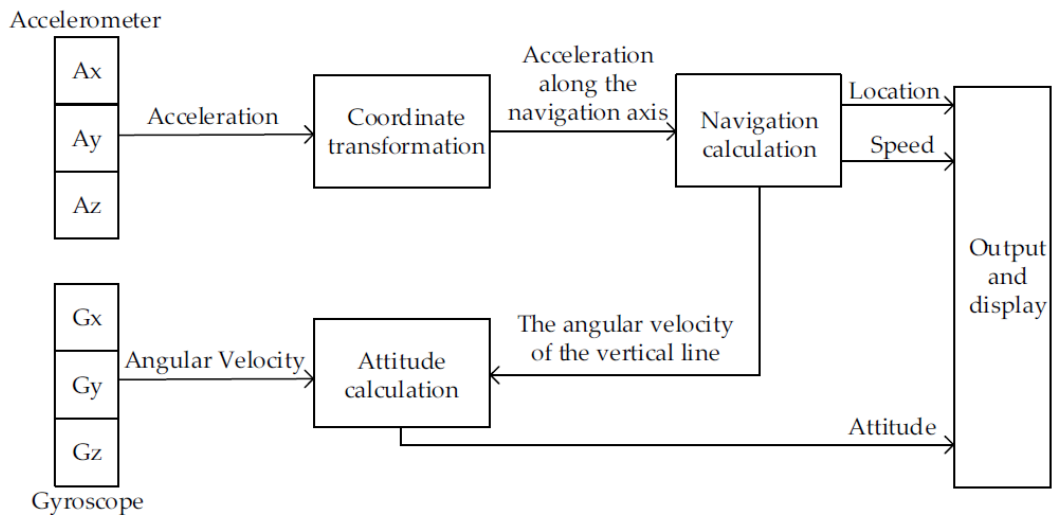


Рисунок 3.1 – Принципова схема бесплатної інерціальної навігаційної системи

Хоча забезпечення тривалої високої точності є важливим для багатьох навігаційних застосувань, таких як космічні кораблі, ракети, літаки та військові кораблі, існуючі SINS не забезпечують ефективною та результативною підтримки в режимі реального часу отримання високої точності положення. По-перше, SINS не забезпечує синхронну вибірку акселерометрів і гіроскопів, тому через певний проміжок часу будуть відхилення в часі між цими двома типами даних. Оскільки кінцеве вихідне положення є злиттям цих двох типів даних, їх різниця в часі призводить до неточності обчисленого кута положення. Тому пропонувати схему синхронного збору даних акселерометра та гіроскопа необхідно для корекції та компенсації кута орієнтації для тривалої навігації, особливо якщо змінюється прискорення.

Крім того, це важливий спосіб коригування та компенсації кута орієнтації шляхом підвищення точності вимірювань акселерометрів або гіроскопів. Як описано в вище, рівноточний метод вимірювання частоти може забезпечити високу точність вимірювання. Однак цей метод все ще має проблему диференціювання помилки підрахунку імпульсів при підрахунку стандартних сигналів. Отже, щоб підвищити точність дискретизації QVBA, у цій роботі пропонується вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності.

Число з плаваючою комою має характеристики високої точності, широкого діапазону представлення даних тощо, тому воно використовується в QVBA під час обчислення частоти. FPU може виконувати операцію з плаваючою комою з високою швидкістю [59]. Враховуючи неефективну швидкість перетворення існуючих QVBA, апаратний FPU вводиться в модуль вимірювання частоти для прискорення розрахунку значення частоти.

### Структурна схема розробленого пристрою

Ми пропонуємо структуру підвищення точності ставлення для вирішення вищезазначених проблем. Огляд нашої схеми показано на рис.3.2 та наведено в додатку А. Він складається з трьох компонентів: Модуль синхронного збору даних призначений для виконання синхронної вибірки акселерометрів і гіроскопи. Він вирішує проблему точності корекції та компенсації кута орієнтації для підвищення точності кута орієнтації, обчисленого в SINS; пропонується вдосконалений модуль вимірювання частоти рівної точності для підвищення точності дискретизації акселерометра. Для підвищення швидкості перетворення QVBA введено апаратний FPU, який прискорює розрахунок значення вимірювання частоти.

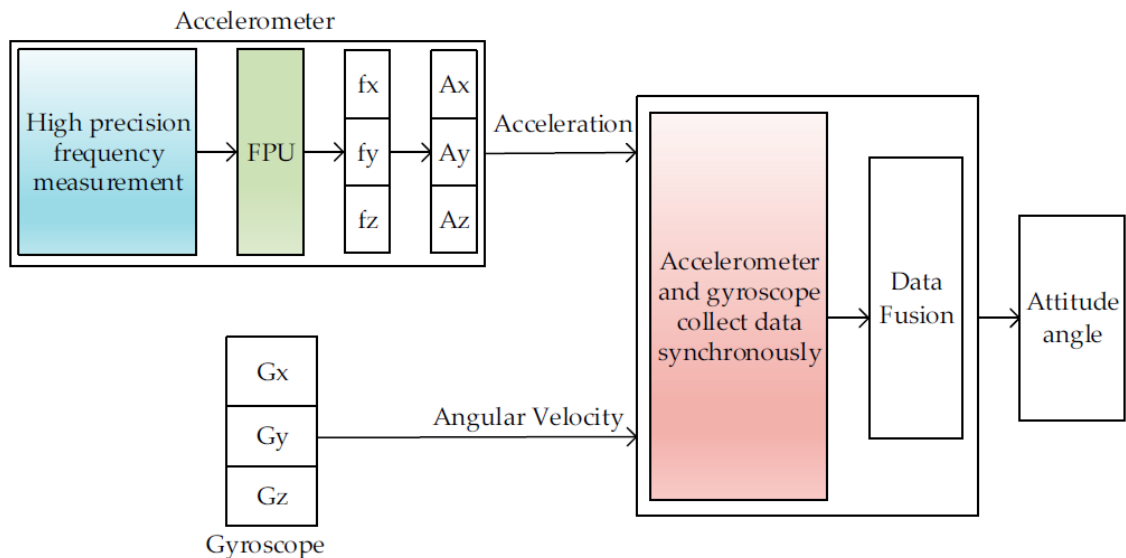


Рисунок 3.2 – Блок схема розробленої системи

Як показано на рис.3.2, у SINS, який ми розробили, схема синхронного збору даних, високоточний збір даних акселерометром і FPU є центром цієї статті. Конструкція модуля збору даних гіроскопа та алгоритм об'єднання даних відносяться до існуючих методів. Основний принцип роботи цих модулів полягає в наступному. Навігаційний комп'ютер підраховує імпульси демодуляції гіроскопа та імпульси бафету гіроскопа. Після того, як імпульси буферизації вводяться в схему фільтра через схему вхідного фільтра, вони надсилаються до FPGA через схему формування тригера Шмітта. Імпульси демодуляції генеруються схемою демодуляції гіроскопа та надсилаються на лічильник. У цей час сигнали дискретизації акселерометра та гіроскопа можуть бути синхронно зафіксовані. Потім, на основі синхронних даних акселерометра та гіроскопа, ми використовуємо метод кватерніонів для обчислення положення та

використовуємо метод комплементарної фільтрації для об'єднання даних. Конкретну реалізацію можна знайти в роботі [48].

### **Механізм синхронного збору інформації**

Конструкція модуля синхронного збору даних розділена на дві частини, включаючи апаратну та програмну частину. Процес реалізації виглядає наступним чином:

Конструкція обладнання показана на рис.3.3. Ми реалізували апаратну частину на мікросхемі FPGA за допомогою дуже високошвидкісної мови опису обладнання інтегральної схеми (VHDL). Оскільки є три акселерометри в SINS, розроблена система дискретизації частоти може вимірювати частотні сигнали трьох акселерометрів. Після отримання виміряного значення генерується сигнал про завершення блокування значення підрахунку, і модуль обчислення з плаваючою комою повідомляється для зчитування значення підрахунку для розрахунку частоти. У той же час навігаційний комп'ютер підраховує імпульси демодуляції гіроскопа та імпульси бафету гіроскопа. Після того, як імпульси буферизації вводяться в схему фільтра через схему вхідного фільтра, вони надсилаються в FPGA через схему формування тригера Шмітта. Імпульси демодуляції генеруються схемою демодуляції гіроскопа та надсилаються на лічильник. У цей час рис.3.3 демонструє дизайн програмного забезпечення. Ми реалізували програмну частину на мікросхемі DSP за допомогою мови C. У режимі синхронного збору даних, коли користувач записує команду блокування на лічильник гіроскопа, операція блокування та операція обчислення частоти акселерометра лічильник вимірювань також запускаються одночасно. Щоб забезпечити надійність зчитування цих двох лічильників, виміряне значення не можна зчитувати безпосередньо. Коли потрібно прочитати лічильник, програмне забезпечення має спочатку надіслати команду фіксації, записавши її у відповідний регістр команд фіксації лічильника. Потім поточне значення підрахунку лічильника гіроскопа фіксується в регістрі фіксації значення лічильника, тим часом значення вимірювання частоти акселерометра також фіксується в регістрі фіксації значення лічильника. Таким чином, значення підрахунку кожного лічильника можна отримати шляхом зчитування регістра-фіксатора значення підрахунку. Цей метод також забезпечує синхронне фіксування значення лічильника гіроскопа та прискорення, таким чином можна усунути помилки, спричинені послідовним зчитуванням програмним забезпеченням різних лічильників і значень частоти.



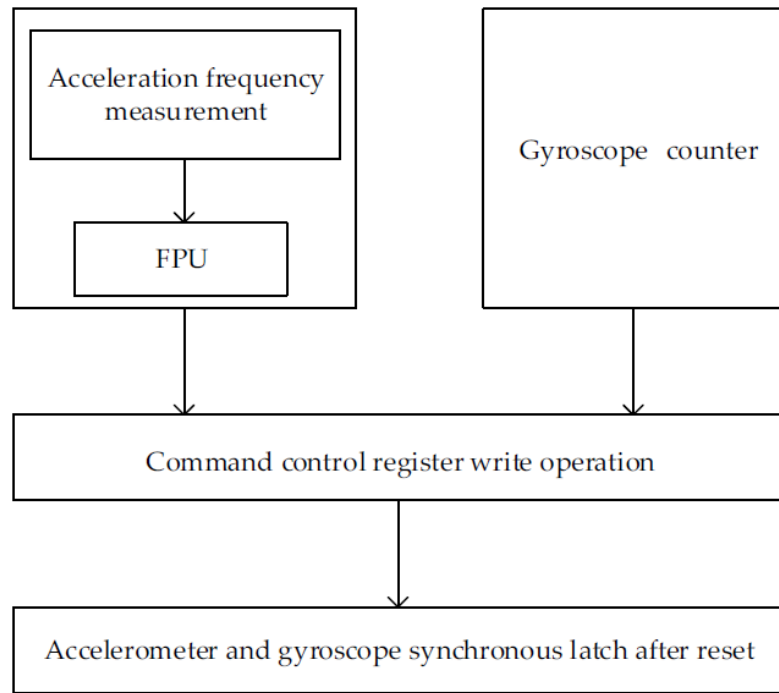


Рисунок 3.3 – Дизайн апаратного забезпечення модуля синхронного збору даних

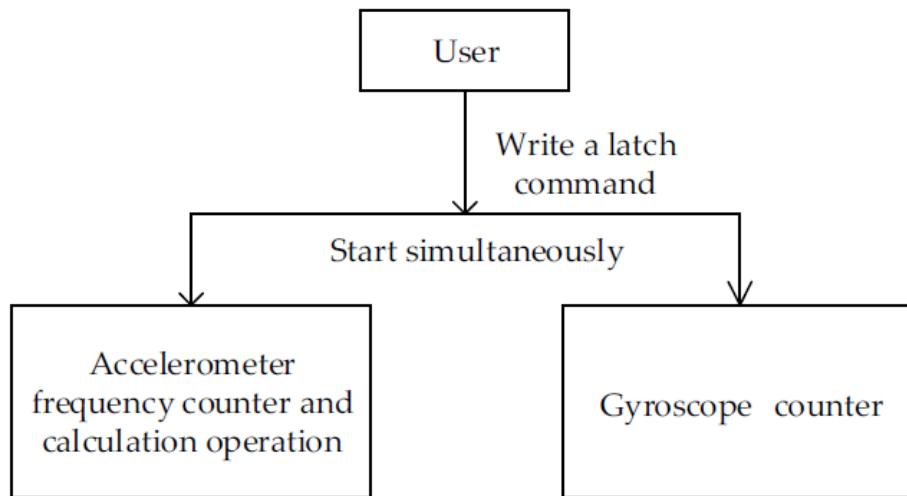


Рисунок 3.4 – Програмне проектування модуля синхронного збору даних

### Покращений рівноточний метод вимірювання частоти

Для рівноточного вимірювання частоти потрібні два лічильники та відомий стандартний сигнал частоти. Принцип вимірювання частоти полягає в тому, щоб спочатку задати заданий час відкриття воріт. У цей час лічильник не починає відлік. Однак, коли надходить передній фронт вимірюваного сигналу, сигнал синхронізації використовується для синхронізації сигналу стробування та вимірюваного сигналу. При цьому лічильник починає відлік. У цей момент буде отримано значення підрахунку двох лічильників, а значення частоти вимірюваного сигналу можна отримати шляхом поєднання зі значенням частоти

стандартного сигналу. малюнок 5 показана часова діаграма рівноточності метод вимірювання; лічильник обчислює лише кількість імпульсів за фактичний час ширини затвора.

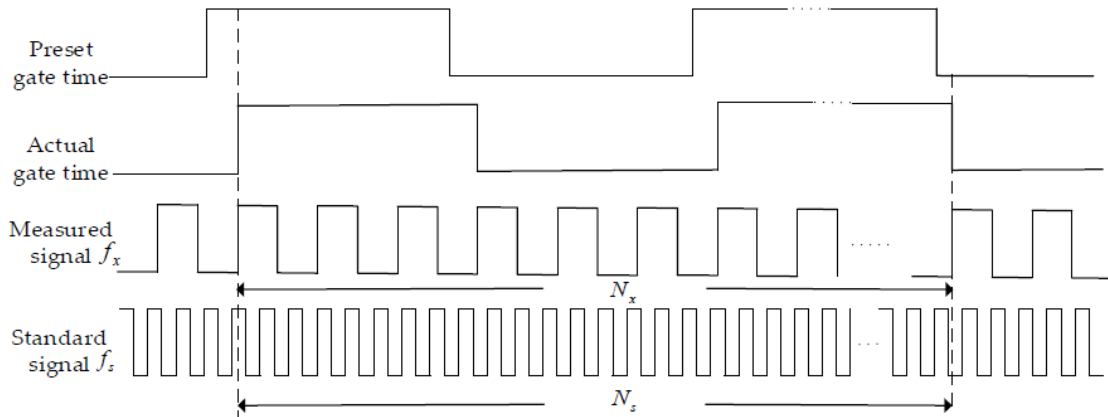


Рисунок 3.5 – Часова діаграма рівноточного методу вимірювання частоти

Це видно з рис.3.5, та наведено в додатку А, що фактичний час стробування є не фіксованим значенням, а цілим кратним періоду сигналу, який вимірюється. Таким чином, при підрахунку перевіреного сигналу немає помилки підрахунку. Однак фактичний сигнал часу стробування не синхронізований зі стандартним сигналом, тому все ще існує проблема помилки різниці одного імпульсу під час підрахунку стандартного сигналу.

Припустимо, що під час стробування,  $T$ , значення лічильника,  $N_x$  позначає кількість імпульсів сигналу, який потрібно виміряти,  $N_s$  позначає кількість імпульсів стандартного сигналу, а частота стандартного сигналу дорівнює  $f_s$ . Частота вимірюваного сигналу  $f_x$ , то є:

$$N_x = f_x \times T. \quad (3.2)$$

$$N_s = f_s \times T. \quad (3.3)$$

Таким чином, значення частоти вимірюваного сигналу дорівнює:

$$f_x = \frac{N_x}{N_s} \times f_s. \quad (3.4)$$

Удосконалений метод вимірювання частоти рівної точності використовує сигнал стандартної частоти,  $f_s$ , для вимірювання сигналу вимірюваної частоти,  $f_x$ , що зменшує помилку, спричинену підрахунком імпульсів стандартного сигналу під час вимірювання. Конкретна реалізація та робочий процес є такими: Як показано на рис.3.6, Counter1 і Counter2 є двома контрольованими лічильниками без повернення нуля.

Сигнал стандартної частоти надходить із вхідного терміналу синхронізації Counter1; вимірюваний сигнал після формування надходить із

вхідного терміналу синхронізації Counter2. Коли попередньо встановлений стробуючий сигнал має високий рівень, наростаючий фронт вимірюваного сигналу після формування запускає лічильник 1 і лічильник 2 одночасно через термінал Q тригера D, а значення підрахунку становлять  $N_x$  і  $N_s$  відповідно. Коли заданий стробуючий сигнал має низький рівень, наростаючий фронт наступного вимірюваного сигналу призведе до одночасного вимкнення обох лічильників.

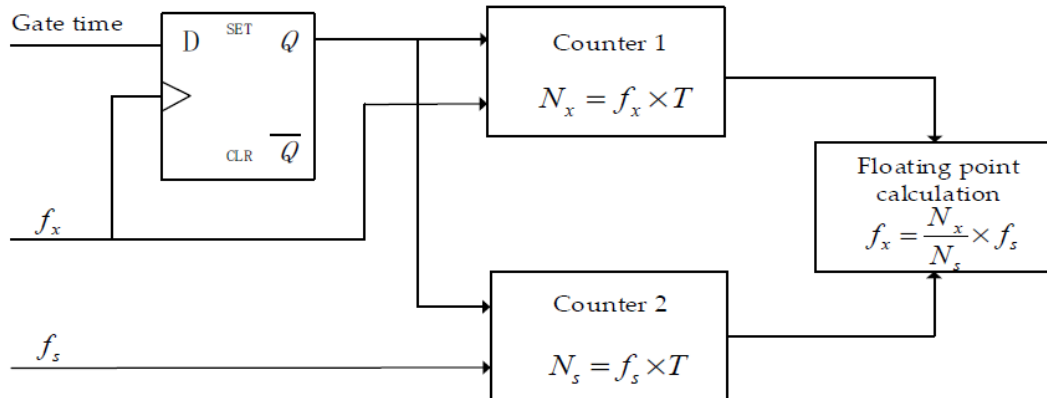


Рисунок 3.6 – Архітектура рівноточного методу вимірювання частоти

Під час стробування  $T$  два лічильники нуля без повернення, Counter1 і Counter2, використовуються для виконання безперервний підрахунок в вимірювальному модулі. Отже, кількість імпульсів,  $N_x$ , вимірюваного сигналу та кількість імпульсів,  $N_s$ , стандартної частоти безперервно підраховуються. Усі ці два лічильники збільшуються на 1 по наростаючому фронту сигналу частоти. Коли кожен лічильник досягає максимального значення, він автоматично повертається до нуля та починає підраховувати знову. Якщо потрібно зафіксувати значення лічильника, фіксуються лише поточні значення двох лічильників. Оскільки в цій ситуації лічильники не обнуляються, безперервність роботи лічильників може бути забезпечена. Крім того, похибки вимірювань за допомогою тривалої інтеграції можна усунути більш зручно. Після цього поточне фіксоване значення віднімає попереднє фіксоване значення, щоб отримати значення підрахунку між поточним імпульсом фіксації та останнім імпульсом фіксації.

У порівнянні зі звичайним рівноточним методом вимірювання з використанням періодичного вентиля для фіксації даних, наш модуль вимірювання частоти використовує активний сигнал фіксації для фіксації лічильника. Наростаючий фронт імпульсу фіксатора використовується для встановлення прапора отримання значення підрахунку, коли надходить імпульс. Коли цей прапор стає дійсним, лічильники сигналу стандартної частоти та вимірюваного сигналу фіксуються в наступному циклі після

наростаючого фронту виміряного сигналу. Це забезпечує визначуваність у часі зафіксованого значення лічильника та синхронність із циклом завдання. Після того, як команда фіксації синхронізована з наростаючим фронтом сигналу вимірюваної частоти, поточні значення підрахунку лічильник 1 і лічильник 2 фіксуються на наступному передньому фронті стандартного тактового сигналу. Потім шляхом віднімання попереднього зафіксованого значення можна отримати значення підрахунку,  $N_x$  і  $N_s$ , між сусідніми зафіксованими командами. Рівняння (4) є значенням частоти вимірюваного сигналу.

Після отримання  $N_x$  і  $N_s$  генерується сигнал завершення фіксації для інформування модуля обчислення з плаваючою комою та програмного забезпечення для наступного обчислення частоти.

### ФПУ

У роботі застосували послідовне обчислення з плаваючою комою з періодом 16 мкс для модуля вимірювання частоти. Порівняно з паралельним обчисленням з плаваючою комою, послідовне обчислення має низькі апаратні витрати. Значення частоти виміряного сигналу обчислюється відповідно до рівняння (3.4), а кінцевим результатом є нормалізоване число з плаваючою комою подвійної точності, яке відповідає стандарту IEEE 754. Щоб виконати це обчислення з плаваючою комою, наш розроблений FPU виглядає так, як показано на рис.3.7. FPU включає чотири процеси: множення  $f_s$  і  $N_x$ , перетворення фіксованої коми в плаваючу кому, ділення з плаваючою комою та фіксацію результату. Обчислення з плаваючою комою виконуються в порядку  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  і  $Z_3$ . Процес обчислення з плаваючою комою починається одразу після завершення відповідного блокування значення лічильника.

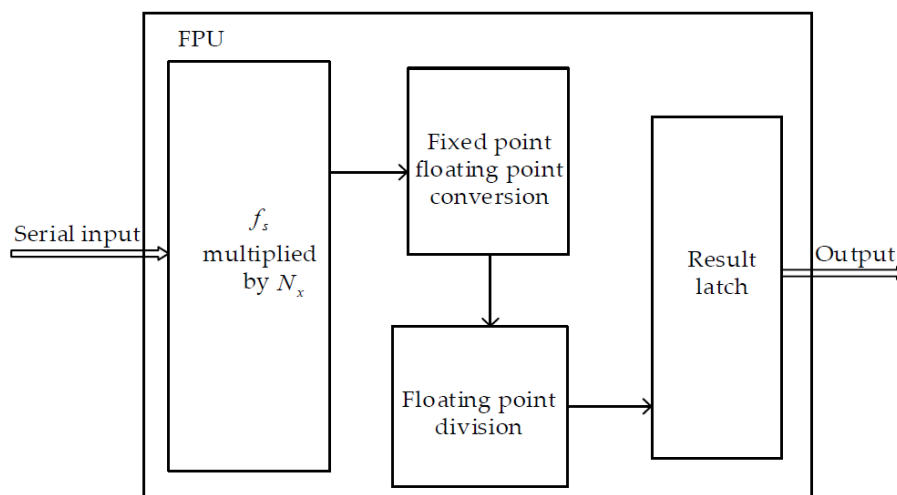


Рисунок 3.7 – Процес обчислення з плаваючою комою.

### 3.3 Експериментальні дослідження

#### Система вибірки частоти акселерометра

Як описано в розділі 2, SINS вимагає трьох акселерометрів. Виходи кожного акселерометра триканальні частотні сигнали,  $f_{11}$ ,  $f_{12}$  і  $f_{13}$ , серед яких  $f_{11}$  і  $f_{12}$  є частотними сигналами, а  $f_{13}$  є температурним і частотним сигналом, що позначає внутрішню температуру акселерометра. Таким чином, система дискретизації частоти, розроблена в цій статті, повинна вимірювати та обчислювати дев'ятиканальні частотні сигнали. Потім, на основі вищезазначеного рівняння (3.1), ми можемо обчислити миттєве значення прискорення відповідно до значень частоти, виведених з акселерометра. малюнок 8 є базовою структурною схемою системи дискретизації частоти акселерометра, яка в основному виконана в мікросхемі Xilinx Spartan-3A FPGA XC3S1400AN. Серед них дев'ятиканальний модуль вимірювання частоти складається з функцій обробки логіки FPGA з використанням VHDL. Фактично він складається з дев'яти модулів вимірювання частоти однакової точності. Кожен модуль вимірювання частоти використовує сигнал дискретизації акселерометра та сигнал дискретизації гіроскопа синхронізувати збір даних. Це дозволяє об'єднувати дані акселерометра та пристрою в реальному часі гіроскоп у SINS, таким чином роблячи вихідний кут орієнтації більш точним.

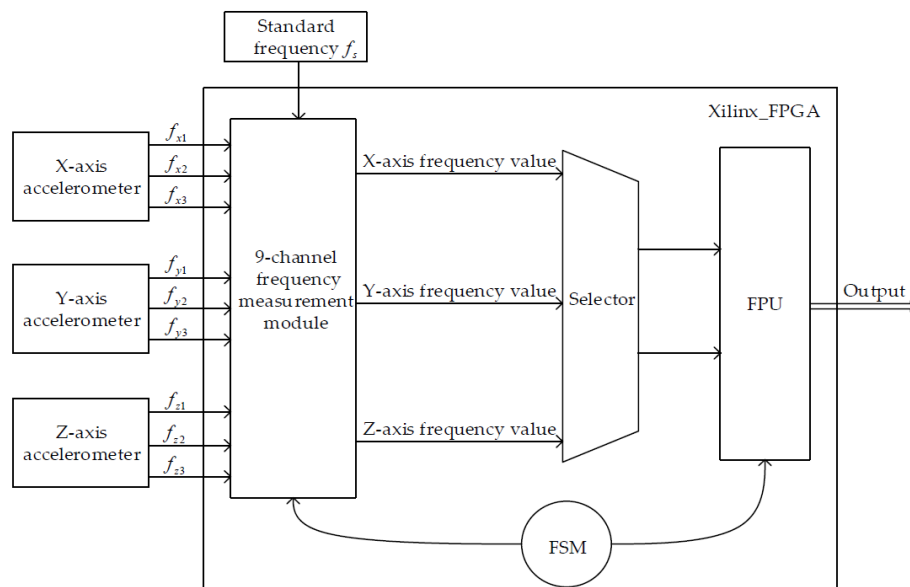


Рисунок 3.8 – Кварцовий вібраційний акселерометр виведення та система збору даних

#### Аналіз похибок вимірювання частоти

Відповідно до принципу вимірювання, похибка вимірювання методу

розрахунку еквівалентного прецизійного вимірювання частоти аналізується наступним чином.

По-перше, похибку вимірювання частоти можна отримати шляхом диференціювання рівняння (3.4) таким чином

$$df_x = \frac{f_s}{N_s} dN_s - \frac{N_x}{N_s^2} f_s dN_s + \frac{N_x}{N_s} df_s . \quad (3.5)$$

Згідно з наведеним вище принципним аналізом, можна побачити, що під час стробування час стробування є цілим числом, кратним  $f_x$ , тоді немає помилки підрахунку для значення  $N_x$  для  $f_x$  у цей час, тому  $dN_x = 0$ . похибка значення підрахунку,  $N_s$ , для  $f_s$  відрізняється щонайбільше на один імпульс, тобто  $dN_s = \pm 1$ .

Тоді відносну похибку цього методу вимірювання можна розрахувати як

$$\delta = \frac{df_x}{f_x} = \frac{df_s}{f_s} \pm \frac{1}{N_s} . \quad (3.6)$$

У рівнянні (3.6) вище похибка вимірювання частоти пов'язана лише з частотою та значенням підрахунку стандартного лічильника сигналу, але не залежить від сигналу частоти, що підлягає вимірюванню, тобто досягається однакова точність вимірювання в вимірюваному діапазоні частот . Похибка частоти стандартного сигналу становить  $\Delta f_s/f_s$ . Завдяки високій стабільності кристала відносна похибка стандартного сигналу мала і незначна.

Якщо в фактичній частота з в вимірюваний сигнал є встановити як  $f_x'$ , інший вираз вимірювання помилка надається

$$\delta = \frac{|f_x' - f_x|}{f_x} \times 100\% . \quad (3.7)$$

якщо помилку частоти стандартного сигналу ігнорувати, то відповідно до рівняння (3.7) фактичну частоту вимірюваного сигналу можна виразити як

$$f_x' = \frac{N_x}{N_s \pm dN_s} f_s . \quad (3.8)$$

Підставляючи рівняння (3.4) і (3.8) у рівняння (3.7), таким чином



$$\delta = \frac{dN_s}{N_s} \times 100\% \leq \frac{1}{N_s} = \frac{1}{Tf_s}. \quad (3.9)$$

Відповідно до рівнянь (3.9) і (3.6) можна побачити, що чим довший час стробування  $T$  або чим вища стандартна частота сигналу  $f_s$ , тим меншою буде відносна похибка вимірювання частоти. Якщо припустити, що частота стандартного сигналу становить 100 МГц, поки фактичний час стробування більше або дорівнює 1 с, максимальна відносна похибка вимірювання може бути меншою або дорівнювати  $10^{-8}$ .

### Алгоритм додаткової фільтрації

Ми використали існуючі комплементарні алгоритми фільтрації [38] для об'єднання даних. Принцип комплементарного алгоритму фільтрації показано на рис.3.9. Даними, вимірними гіроскопом, є кутова швидкість  $\alpha$  та кут нахилу  $\theta_\alpha$ , які можна обчислити за допомогою інтегральної операції. Як зазначено в вище, дані, виміряні акселерометром, є частотою трьох осей ( $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$ ), яка пропорційна прикладеній зовні силі. Тоді, згідно з рівнянням (3.1), можна отримати прискорення по трьох осях ( $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ ) відповідно. Кут орієнтації,  $\theta_g$ , можна обчислити за допомогою алгоритму орієнтації. Протягом короткого проміжку часу на кут орієнтації, отриманий гіроскопом, не вплинуло б прискорення носія, тому він точний. Однак інтегральний дрейф і температурний дрейф мають зростаючий вплив з часом, що робить результат гіроскопа неточним. Середній кут, виміряний акселерометром, використовується для калібрування кута орієнтації, виміряного гіроскопом. Тому в короткостроковій перспективі головним є гіроскоп використовується, а сигнал, отриманий гіроскопом, має фільтрувати низькочастотну частину. У довгостроковій перспективі в основному використовується акселерометр, і сигнал акселерометра повинен фільтрувати високочастотну частину. Сигнали двох комплементарних смуг додаються, щоб отримати калібрований кут огляду  $\theta$ .

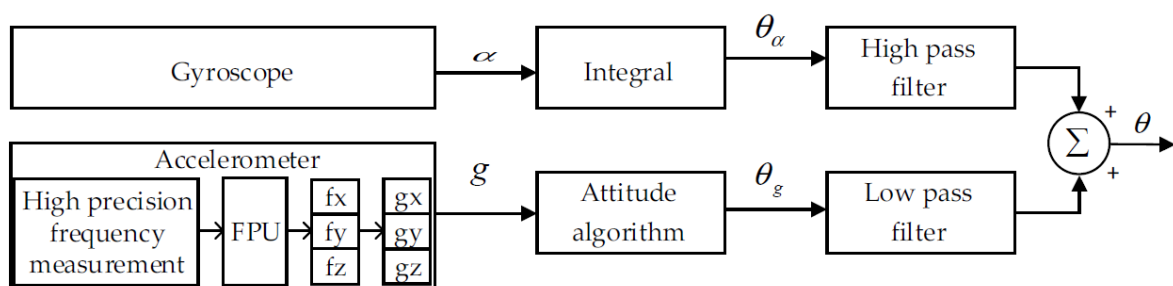


Рисунок 3.9 – Принцип комплементарної фільтрації.

Припустимо, що вихідний сигнал проходить через фільтр неущкодженим, високочастотний шум  $\theta_g$  проходить через фільтр низьких частот, а низькочастотна перешкода  $\theta_a$  проходить через фільтр високих частот. За передумови обґрунтованого встановлення порогу високого/низького проходження помилка може бути мінімізована, а справжнє значення відношення наближено за такою формулою розрахунку

$$\theta = \frac{\tau}{\tau + dt}(\theta' + \alpha dt) + \frac{dt}{\tau + dt}\theta_g. \quad (3.10)$$

де  $\tau$  — постійна часу,  $dt$  — період вибірки,  $\theta'$  — розраховане значення кута попереднього періоду,  $\alpha$  — кутова швидкість, виміряна гіроскопом, а  $\theta_g$  — значення кута, виміряне акселерометром.

### Експериментальні результати вимірювання частоти

Для наших експериментів FPGA, яку ми використовували для реалізації системи дискретизації частоти акселерометра, має стандартну частоту 80 МГц. Діапазон вимірюваних частот становить від 20 кГц до 50 кГц, а час стробування становить 20 мс. Результати випробувань дев'ятиканальних частотних сигналів трьох кварцових акселерометрів наведені в табл.3.1

Таблиця 3.1 – Результати випробувань

Номер каналу	Теоретичні значення /кГц	Вимірювані значення /кГц	Абсолютна похибка /Гц
X1	17.9909751	17.9909874	0.0123
X2	14.0023108	14.0023204	0.0096
X3	22.0183216	22.0183232	0.0016
Y1	29.9999511	29.9999747	0.0236
Y2	25.9739942	25.9740014	0.0072
Y3	33.9942926	33.9943092	0.0166
Z1	41.9579906	41.9580023	0.0117
Z2	37.9746063	37.9746556	0.0493
Z3	45.9769553	45.9769680	0.0127

З табл. 3.1, бачимо, що абсолютна похибка модуля вимірювання частоти становить менше 0,05 Гц. Відповідно до масштабного коефіцієнта кварцового променевого акселерометра, який становить 50 Гц/г, точність вимірювання модуля вимірювання частоти становить менше 1 мг. Довгостроковий сукупна похибка вимірювання частоти менше 10<sup>-4</sup>. Взявши як приклад канал Y1, теоретичне значення, виміряне  $f_x$ , становить 29 999,9511 Гц. Виміряне значення підрахунку  $N_s$  становить 2037335,  $N_x$  дорівнює 661, а виміряне значення  $f_x$ , обчислене за рівнянням (4), становить 29 999,9747 Гц.

Таким чином, абсолютна похибка модуля прецизійного вимірювання частоти становить 0,0236 Гц, а відносна –  $5,53 \times 10^{-7}$ . Якщо система використовує програмне забезпечення для розрахунку значення вимірювання частоти, час розрахунку від вибірки до компенсації кута нахилу становить 95,8 мкс. Щоб прискорити обчислення, для обчислення вимірюваного значення частоти використовується апаратний блок FPU. У разі використання FPU час розрахунку становить 27,8 мкс. Порівняно з програмним підходом час роботи скорочується на 40,8%, а продуктивність покращена в три рази.

### Експериментальні результати злиття даних

Порівняння синхронного та асинхронного збору зображено на рис.3.10. Припустімо, що протягом того самого циклу гіроскоп отримує дані один раз кожні 5 мс, а точками вибірки є А, В і С. Використовуючи запропоновану нами схему синхронного збору даних, точки вибірки прискорення також є А, В і С. Однак, у поточному SINS акселерометр і гіроскоп працюють незалежно на відповідних частотах дискретизації. Між ними існує певний ступінь асинхронності, що призводить до певної помилки,  $\Delta t$ , тому асинхронне отримання спричинить велику кумулятивну помилку. Це має негативний вплив на точність кінцевого розрахованого кута огляду і навіть призводить до того, що дані будуть неточними. Однак синхронна схема збору робить кінцевий розрахований кут огляду близьким до ідеального значення.

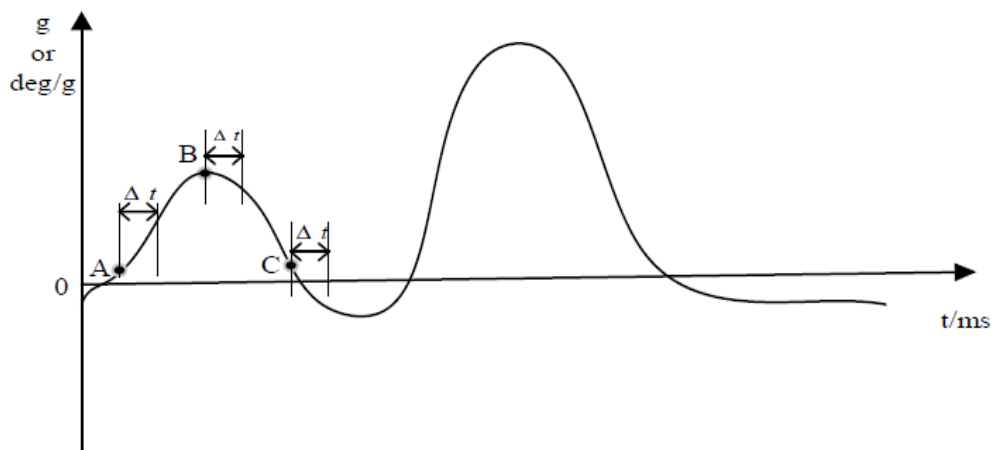


Рисунок 3.10 – Порівняння синхронного та асинхронного збору даних.

У цій статті ми виконали високоточне вимірювання частоти на QVBA, що відповідно покращує точність значення прискорення. Використовуючи FPU, ми прискорили розрахунок значення вимірювання частоти. Це заощадило час перетворення. Під час синхронного збору даних акселерометра

та гіроскопа помилка, викликана асинхронним ступенем, усувається. Оскільки інтеграція гіроскопа створює кумулятивну помилку, тоді як акселерометр компенсує її дрейф, таким чином покращуючи точність кута орієнтації.

Щоб перевірити дію запропонованої нами схеми, ми провели експериментальну перевірку на платформі моделювання IMU. Початкові дані QVBA та гіроскопа разом із кутом орієнтації, розрахованим платформою моделювання IMU, були імпортовані в MATLAB для експерименту.аналіз. Взявши за приклад кут нахилу та кут крену, результати аналізу показані на наступних малюнках.

Рисунок 3.11 та наведено в додатку А, представляє дані синхронної та асинхронної вибірки акселерометра та гіроскопа за той самий період вибірки. У випадку асинхронної вибірки існує певний ступінь асинхронності між акселерометром і гіроскопом, що призвело до відмінностей у моментах вибірки, коли виводилися результати вибірки. Дані вибірки акселерометра та гіроскопа показано на рис.3.11 а–с. Суцільна рожева лінія вказує на дані акселерометра по трьох осях у разі теоретичної синхронізації. Синя пунктирна лінія вказує на дані акселерометра по трьох осях у разі фактичної синхронізації. Червона пунктирна лінія вказує на дані акселерометра по трьох осях у разі несинхронізації. Рис.3.11d показує тривісні дані кутової швидкості гіроскопа в трьох випадках. З цього малюнка ми бачимо, що дані гіроскопа залишаються незмінними в трьох наведених вище випадках.

Для подальшого аналізу відмінностей між синхронною вибіркою та асинхронною вибіркою ми частково збільшили рис.3.11, як показано на рис.3.12. та наведено в додакут А, рис.3.12а представляє дані синхронної та асинхронної вибірки акселерометра. Рис.3.12б показана тривісна кутова швидкістьдані гіроскопа. Тут ми беремо дані осі Y акселерометра як приклад. На рис.3.12а, дані акселерометра та гіроскопа були отримані синхронно в момент часу  $t_1$  за того самого початкового періоду вибірки  $T$ , і  $T$  становив 10 мс.

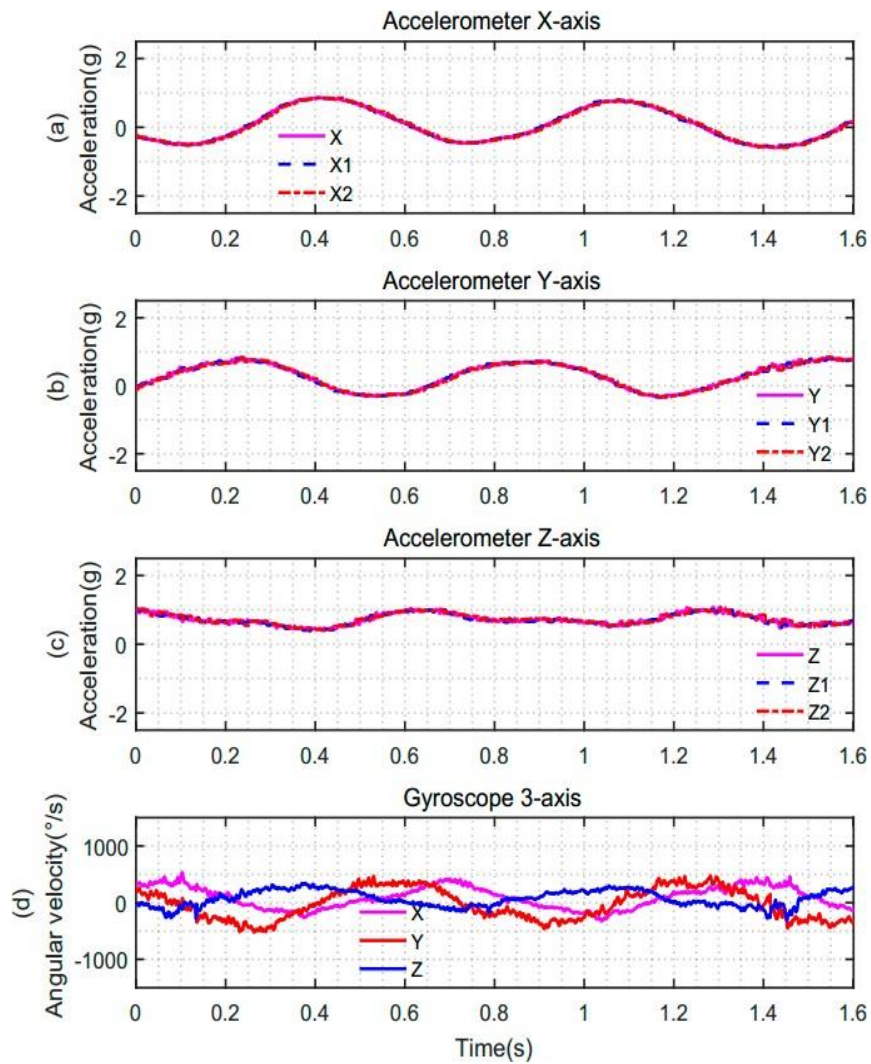


Рисунок 3.11 – Дані акселерометра і гіроскопа. (а) Дані осі X акселерометра; (b) Дані осі Y акселерометра; (c) дані осі Z акселерометра; (d) дані трьох осей гіроскопа

Однак у асинхронній системі, припустимо, що дані гіроскопа отримано в момент часу  $t_1$ , прискорення буде в будь-якій позиції періоду розрахунку вибірки,  $T$ . Припустимо, що вибірка прискорення здійснюється в момент часу  $t_2$  на рис.3.12, існує похибка  $\Delta t$  між зразком прискорення та зразком гіроскопа. Він накопичує великі похибки, що призводить до неточних кутів орієнтації. У цьому випадку результат злиття не є точним.

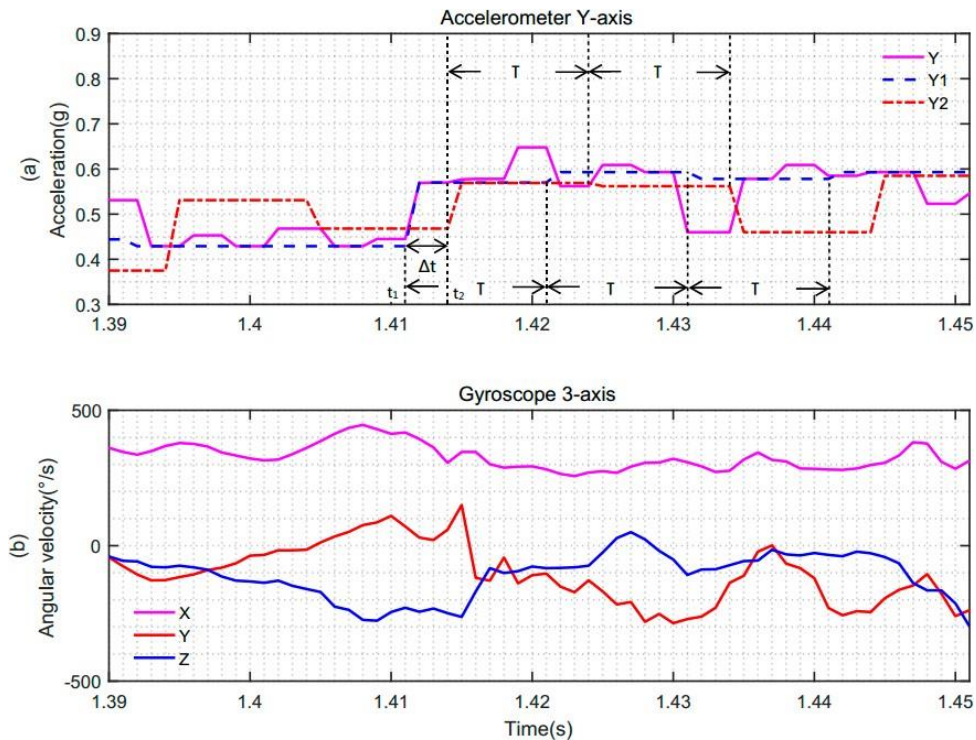


Рисунок 3.12 – Порівняння моментів дискретизації акселерометра та гіроскопа у випадку синхронної та асинхронної дискретизації. (а) Дані осі Y акселерометра; (б) дані трьох осей гіроскопа.

У випадку синхронізації та несинхронізації, наведених вище, початкові дані акселерометра та дані гіроскопа об'єднуються за допомогою додаткового алгоритму фільтрації на основі методу кватерніону. Отримані кути нахилу, як показано на рис.3.13. Суцільна рожева лінія – це кут нахилу та кут крену кута орієнтації, отримані в ситуації теоретичного синхронного збору даних. Синя пунктирна лінія – це кут нахилу та кут нахилу, отримані нашим механізмом синхронного збору даних. Червона пунктирна лінія – це кут нахилу та кут крену, отримані в ситуації несинхронного збору даних.

Щоб чітко побачити вплив кута огляду, отриманого на рис.3.13, ми частково збільшили рис.3.13, як показано на рис.3.14 та наведено в додатку А. Взявши кут нахилу як приклад, ми бачимо, що синя пунктирна лінія ближче до суцільної рожевої лінії, а червона пунктирна лінія – далеко від суцільної рожевої лінії. Іншими словами, кут орієнтації, отриманий за допомогою даних механізму синхронного збору даних, є більш точним і в режимі реального часу. У разі несинхронізації отриманий кут кута нахилу не є точним. Далі показано, що ступінь синхронізації між вимірюванням прискорення та кутом орієнтації гіроскопа має великий вплив на точність компенсації та корекції. Ці експериментальні результати підтверджують достовірність запропонованих методів.



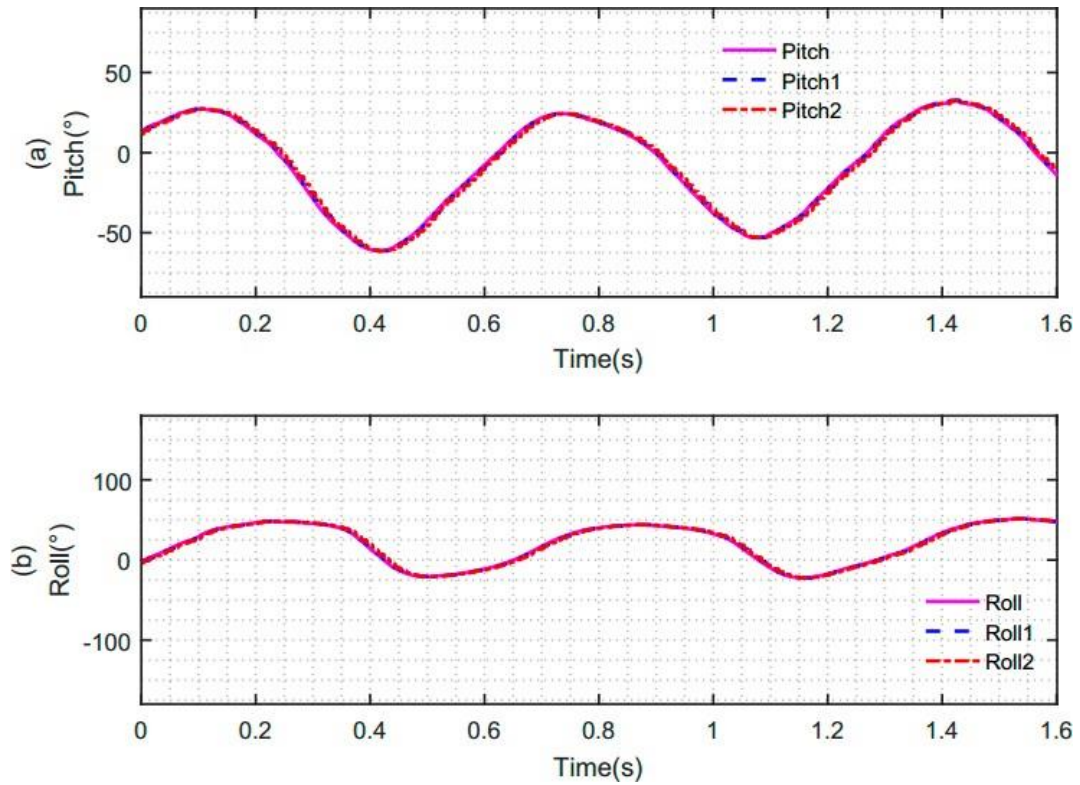


Рисунок 3.13 – Кут орієнтації, отриманий шляхом злиття даних акселерометра та гіроскопа. (а) Кут тангажу, отриманий шляхом злиття акселерометра та гіроскопа за різних умов; (б) кут крену, отриманий шляхом злиття акселерометра та гіроскопа за різних умов

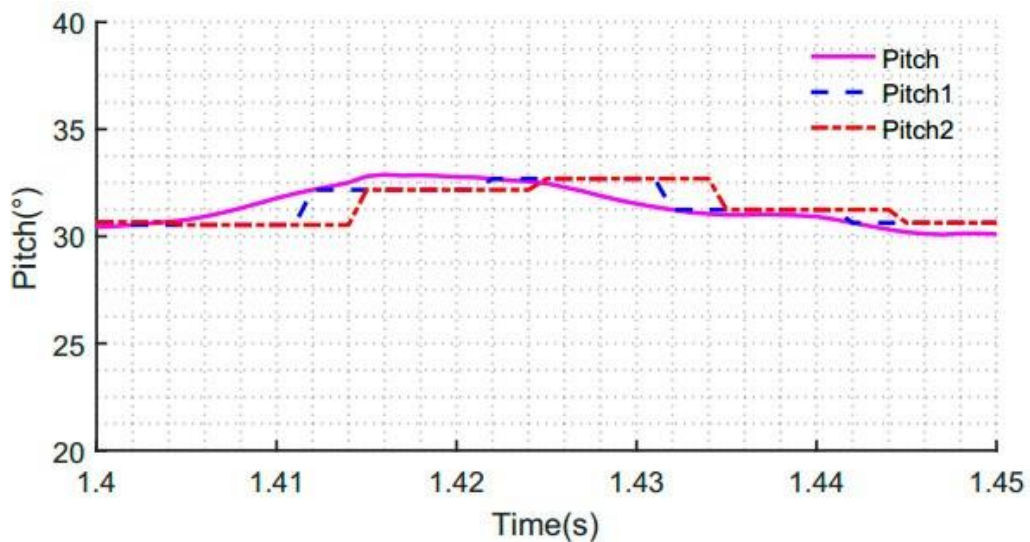


Рисунок 3.14 – Частково збільшений кут нахилу, отриманий шляхом злиття даних акселерометра та гіроскопа

Щоб оцінити продуктивність запропонованого нами рішення, ми взяли зразки з 1600 значень для проведення перевірки. Ми порівняли дві ситуації: одна полягає в обчисленні різниці кута орієнтації між синхронним збором даних і теоретичним збором даних, інша полягає в обчисленні різниці кута орієнтації між несинхронним збором даних і теоретичним збором даних. За результатами порівняння додатково підтверджується, що кут нахилу, отриманий за запропованою нами схемою, ближчий до теоретичного значення. Статистичні результати цих двох порівняльних експериментальних даних показані на рис.3.15. Рис.3.15a,b показує розподіл кутової похибки, отриманої в випадок синхронізації. Рис.3.15c,d представляє розподіл похибки кута нахилу, отриманий у разі несинхронізації. З рисунків видно, що розподіли похибкидані на рис.3.15c,d більш розсіяні, ніж на рис.3.15a,b. Похибка кута орієнтації у разі синхронізації менша, ніж у разі несинхронізації. Результати перевірки показують, що кут орієнтації, отриманий запропованою нами схемою синхронізації, є більш точним.

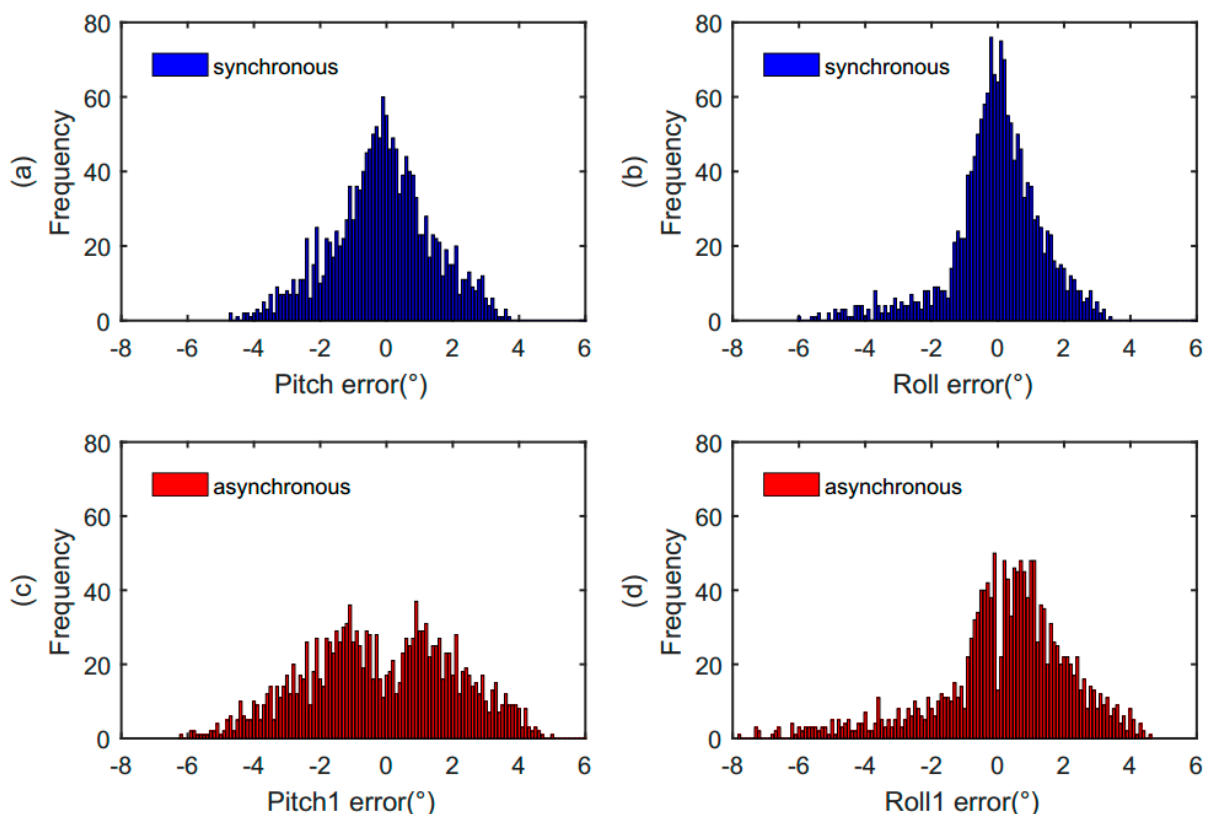


Рисунок 3.15 – Статистичні порівняння похибки кута тангажу та похибки кута крену за різних умов. Розподіл похибки кута тангажу при синхронізації; (b) розподіл похибки кута крену у разі синхронізації; (c) розподіл похибки кута тангажу у разі несинхронізації; (d) розподіл помилки кута крену в разі несинхронізації

Таблиця 3.2 – діапазон розподілу похибки кута орієнтації у разі синхронізації та несинхронізації. Статистичні результати показують, що максимальна похибка кута тангажу становить  $4,69^\circ$  у разі синхронізації. Однак у разі несинхронізації максимальна похибка кута тангажу становить  $6,17^\circ$ . Завдяки запропонованій нами схемі синхронізації похибка кута нахилу зменшується на 24% порівняно з несинхронізацією. Максимальна похибка кута крену становить  $5,9^\circ$  у разі синхронізації та  $7,71^\circ$  у разі несинхронізації. Отже, похибка кута крену, отримана синхронно, зменшується на 23,5% порівняно з отриманою асинхронно. Окрім максимальної похибки, вибіркоче середнє значення похибки кута орієнтації у випадку синхронізації зменшується на 41,6% порівняно з асинхронним.

Таблиця 3.2 – Помилка тесту статистика

Attitude Angle	Error Range		Sample Mean	
	Synchronous	Asynchronous	Synchronous	Asynchronous
Pitch	$[-4.69^\circ \ 3.78^\circ]$	$[-6.17^\circ \ 5.02^\circ]$	$-0.07^\circ$	$-0.12^\circ$
Roll	$[-5.90^\circ \ 3.51^\circ]$	$[-7.71^\circ \ 4.65^\circ]$	$0.14^\circ$	$0.24^\circ$

### 3.4 Висновки до розділу

У даному розділі, щоб підвищити точність кута орієнтації SINS, була запропонована схема синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа. У процесі зміни прискорення цей метод був сприятливим для корекції та компенсації кута орієнтації. Крім того, щоб покращити продуктивність QVBA в SINS, ми запропонували вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності, який зробив точність вибірки QVBA точнішою. Крім того, ми запровадили новий FPU для покращення швидкості обчислення значення вимірювання частоти. Запропоновані методи перевірені експериментально. Показано, що точність кута огляду була покращена.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПШБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (поновому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	0	50	0
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	30	0	40
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		40,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	0	70
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	50	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	60,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [61]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$



де  $k_{нов}$ ,  $k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 40,0$ ,  $k_{теор} = 60,0$  балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 40,0 + 0,4 \cdot 60,00 = 48,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{нау}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем», даний рівень становить 48,00 балів і відповідає статусу - достатній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [61]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=21$  дні.

$$Z_o = 13000,00 \cdot 15 / 21 = 9285,71 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник НДР	13000,00	619,05	15	9285,71
Інженер-конструктор радіоелектронних схем	11900,00	566,67	12	6800,00
Інженер-конструктор робототехнічних систем	11980,00	570,48	15	8557,14
Технік 1-ї категорії	7500,00	357,14	10	3571,43
Всього				28214,29

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, (год.).

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийємо  $M_M=2600,00$  грн на 1.07.2022 року.

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [61];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21$  (дн.);

$t_{зм}$  – тривалість зміни, (год.).

$$C_i = 2600,00 \cdot 1,35 \cdot 1,65 / (21 \cdot 8) = 34,47 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 34,47 \cdot 7,80 = 268,89 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, (год.)	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, (грн.)	Величина оплати на робітника (грн.)
1	2	3	4	5	6
Установка робототехнічного обладнання	7,80	3	1,35	34,47	268,89
Підготовка робочого місця розробника MEMS компонентів	8,00	2	1,10	28,09	224,71
Інсталяція програмного забезпечення конструювання	5,00	5	1,70	43,41	217,05
Формування схеми моделі №1	4,80	4	1,50	38,30	183,86
Формування схеми моделі №2	5,00	5	1,70	43,41	217,05

Продовження таблиці 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

1	2	3	4	5	6
Монтаж датчиків положення	5,20	4	1,50	38,30	199,18
Монтаж датчиків прискорення	12,00	4	1,50	38,30	459,64
Монтаж експериментальних систем	12,00	5	1,70	43,41	520,93
Контроль експериментів	12,00	6	2,00	51,07	612,86
Всього					2904,18

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{доп}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (28214,29 + 2904,18) \cdot 10 / 100\% = 3111,85 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (4.6)$$

де  $H_n$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (28214,29 + 2904,18 + 3111,85) \cdot 22 / 100\% = 7530,67 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і

предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, (кг.);

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, (грн/кг.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, (кг.);

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, (грн/кг.).

$M_1 = 2,00 \cdot 290,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 638,00$  (грн.).

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, (грн.)	Норма витрат, (кг.)	Величина відходів, (кг.)	Ціна відходів, (грн/кг.)	Вартість витраченого матеріалу, (грн.)
1	2	3	4	5	6
Офісний папір 500-8 А4	290,00	2,00	0,000	0,00	638,00
Папір для записів А5 Віс	150,00	4,00	0,000	0,00	660,00
Органайзер офісний	310,00	3,00	0,000	0,00	1023,00
Набір офісного працівника	210,00	3,00	0,000	0,00	693,00
Картридж для принтера	2400,00	2,00	0,000	0,00	5280,00

## Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

1	2	3	4	5	6
Диск оптичний	22,00	3,00	0,000	0,00	72,60
Flesh-пам'ять 32 GB	340,00	2,00	0,000	0,00	748,00
Тека для паперів А4	120,00	3,00	0,000	0,00	396,00
Інше	250,00	1,0	0,000	0,00	275,00
Всього					9785,60

## 4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j, \quad (4.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, (шт.);

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, (грн.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$K_e = 3 \cdot 2780,00 \cdot 1,1 = 9174,00$  (грн.).

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, (шт.)	Ціна за штуку, (грн.)	Сума, (грн.)
Датчики прискорення (акселерометри)	3	2780,00	9174,00
Датчики положення (гіроскопи)	3	4850,00	16005,00
Інтерфейс передачі даних	2	1400,00	3080,00
Всього			28259,00

## 4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного



для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;  
 $C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, (шт.);

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 8600,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 9460,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.8

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, (шт.)	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Імітатор руки промислового робота	1	8600,00	9460,00
Осцилограф цифровий МАХ-250-JIR	1	15400,00	16940,00
Всього			26400,00

#### 4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де  $C_{\text{инрг}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, (грн.);

$C_{прг.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, (шт.);

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{прг} = 7800,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8580,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.9

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows 11	1	7800,00	8580,00
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	1	8700,00	9570,00
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab	1	8800,00	9680,00
Всього			27830,00

#### 4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $Ц_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (26200,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1091,67 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, (грн.)	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, (грн.)
Персональний комп'ютер	26200,00	2	1	1091,67
Робоче місце розробника	8100,00	5	1	135,00
Пристрої виводу інформації	8500,00	4	1	177,08
Оргтехніка	7400,00	4	1	154,17
Приміщення лабораторії	280000,00	25	1	933,33
Всього				2491,25

#### 4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, (кВт);

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, (год.);

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 6,12$  (грн.);

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,82 \cdot 100,0 \cdot 6,12 \cdot 0,95 / 0,97 = 501,84 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,82	100,0	501,84
Робоче місце розробника	0,32	100,0	195,84
Пристрої виводу інформації	0,02	25,0	3,06
Оргтехніка	0,80	10,0	48,96
Імітатор руки промислового робота	2,20	15,0	201,96
Осцилограф цифровий МАХ-250-JIR	0,25	15,0	22,95
Всього			974,61

#### 4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 25\%$ .

$$B_{cv} = (28214,29 + 2904,18) \cdot 25 / 100\% = 7779,62 \text{ (грн.)}.$$

#### 4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (28214,29 + 2904,18) \cdot 30 / 100\% = 9335,54 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (28214,29 + 2904,18) \cdot 50 / 100\% = 15559,23 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальнопромислові) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 110\%$ .

$$B_{нзв} = (28214,29 + 2904,18) \cdot 110 / 100\% = 34230,31 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 28214,29 + 2904,18 + 3111,85 + 7530,667925 + 9785,60 + 28259,00 + 26400,00 + 27830,00 + 2491,25 + 974,61 + 7779,62 + 9335,54 + 15559,23 + 34230,31 = 204406,13 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ZB = 204406,13 / 0,9 = 227117,92 \text{ (грн.)}$$

#### 4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 3$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 2$ ;

$T_c$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_c = 3$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, (тис. грн.). Прийmemo  $B = 227117,92$  (грн.);

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,08$  років, (1 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_c$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [61].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = \frac{3^2 \cdot 3 \cdot 4}{227,1 \cdot 0,08} = 5,71.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» складають 227117,92 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем» є достатній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.



## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Гігієна праці – система забезпечення здоров'я працюючих у процесі трудової діяльності, що включає правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, лікувально-профілактичні, реабілітаційні та інші заходи.

Основне завдання гігієни праці – якісна і кількісна оцінка впливу характеру та умов праці на організм, на основі якої здійснюється розроблення та впровадження заходів, здатних забезпечити максимальну продуктивність праці при відсутності шкідливого впливу факторів трудового процесу на здоров'я працівників; розроблення й оцінювання гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на поліпшення й збереження здоров'я працівників, підвищення працездатності та продуктивності праці.

Розробка MEMS акселерометрів та гіроскопів для роботехнічних систем передачі відбувається в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно ГОСТ 12.0.003-74 [63], можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи під час розробки

### 5.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

#### 5.1.1 Вимоги безпеки під час роботи з екранними пристроями (ПК)

Робочі місця з ПК розміщуються на відстані не менше 1 м від стін зі світловими прорізами.

Відстань між бічними поверхнями відеотерміналів має бути не меншою за 1,2 м.

Відстань між тильною поверхнею одного відеотерміналу та екраном іншого не повинна бути меншою 2,5 м.

Прохід між рядами робочих місць має бути не меншим 1 м.

Висота робочої поверхні столу для відеотерміналу має бути в межах 680–800 мм, а ширина –забезпечувати можливість виконання операцій в зоні

досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота –725 мм, ширина –600–1400 мм, глибина –800–1000 мм.

Екран відеотерміналу та клавіатура мають розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків та символів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Відстань від екрана до ока працівника

Розмір екрану по діагоналі	Відстань від екрана до ока працівник, мм
35/38 см	600-700
43 см	700-800
48 см	800-900
53 см	900-1000

### 5.1.2 Електробезпека

Для забезпечення електробезпеки застосовують окремо або у поєднанні один з іншим наступні технічні способи та засоби: захисне заземлення, занулення.

Захисним заземленням називається навмисний електричний контакт із землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою при замиканні на корпус та через інші причини. Завдання захисного заземлення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку доторкання до корпусу та інших струмоведучих металевих частин електроустановки, що опинилися під напругою. Захисне заземлення застосовують у трифазних мережах з ізольованою нейтраллю.

Принцип дії захисного заземлення – зменшення напруги між корпусом, що опинився під напругою, та землею до безпечного значення. У якості провідників заземлення дозволяється використовувати різні металеві конструкції: ферми, шахти ліфтів, підйомників, сталеві труби електропроводок, відкрито прокладені стаціонарні трубопроводи різного призначення (крім трубопроводів горючих та вибухонебезпечних газів, каналізації і центрального опалення).

Зануленням називається навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замикання на корпус та через інші причини. Завдання занулення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку контакту з корпусом та іншими неструмоведучими металевими частинами електроустановки, що опинилися під напругою внаслідок замикання на корпус.

Вирішується це завдання швидким вимкненням пошкодженої електроустановки із мережі. Принцип дії занулення – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (тобто замикання між фазними та нульовими проводами) з метою викликати більший струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і цим самим автоматично вимкнути пошкоджену установку із мережі живлення. Таким захистом можуть бути плавкі запобіжники, магнітні пускачі з тепловим захистом, контактори у поєднанні з тепловими реле, автомати, що здійснюють захист одночасно від струмів короткого замикання та від перевантаження.

Класифікація приміщень за категоріями електробезпеки залежно від мікроклімату виробничих будівель. Допустимими визнаються умови праці у будівлях, де відносна вологість повітря не перевищує 60%, температура повітря не перевищує 35 °С, а пил та хімічно агресивне середовище – відсутні. За таких умов праці мікроклімат вважається сухим. Вологими називаються умови роботи, де відносна вологість повітря становить від 60% до 75%. Сирі – це такі умови, які характеризуються відносною вологістю повітря в будівлі більшою за 75%. Особливо сирі умови – це умови, із майже стовідсотковою відносною вологістю повітря. Гарячими умовами праці є становище, при якому температура повітря перевищує 35 °С. Запиленими визнаються умови, при яких виділяється велика кількість виробничого пилу, внаслідок чого він може залишатись на зовнішніх поверхнях або навіть проникати у середину обладнання чи апаратів. До умов праці з хімічно активним середовищем відносять умови, при яких у повітрі протягом тривалого часу залишаються гази або краплі рідин, які негативно впливають на ізолюючі властивості і струмопровідні елементи електричних інструментів.

Для дотримання електробезпеки потрібно слідкувати, щоб усі електропристрої були заземлені, всі розетки були марковані та дотримуватись в приміщенні відповідних мікрокліматичних умов.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [64] мікроклімат виробничих приміщень – умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на тепловий обмін працюючих з оточенням шляхом конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування вологи. Ці умови визначаються поєднанням температури,

відносної вологості та швидкості руху повітря, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення.

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року.

Робота розробника MEMS акселерометрів та гіроскопів для роботехнічних систем передачі відноситься до категорії 1 а [67].

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.5.2.

Таблиця 5.2 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено парова система опалення та система припливно-витяжної вентиляції. Раз за зміну здійснюється вологе прибирання та за необхідності – провітрювання через вікна та двері.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

При виконанні даного виду робіт немає небезпеки виділення шкідливих речовин у повітря, але потрібен контроль за складом повітря робочої зони та при збільшенні допустимих норм проводити заходи, щодо усунення надлишку шкідливих речовин.

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [67] Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середньої	середньої	200	500	4	1,5	2,4	0,9

При експлуатації штучного освітлення здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Для забезпечення достатнього освітлення слід максимально використовувати бічне природного освітлення, систематично очищувати скло від бруду та систематично замінювати перегорілі лампи.

#### 5.2.4 Виробничий шум

Стандартного визначення поняття шуму немає. З гігієнічної точки зору під шумом розуміють несприятливе поєднання різних за частотою і силою звуків, які впливають на організм людини, заважаючи працювати і відпочивати.

За фізичною сутністю шум - це механічне коливання часток пружного середовища, що виникає під дією будь-якої збуджуючої сили. При цьому звуком називають регулярні періодичні коливання, шумом — неперіодичні, випадкові коливальні процеси.

Звук або шум виникає при механічних коливаннях у твердих, рідких та газоподібних середовищах. Звуки, що передаються будівельними конструкціями, називаються структурними, а ті що поширюються у

повітряному середовищі, прийнято називати повітряним шумом. Будь-який небажаний звук називають шумом. Шум шкідливий для здоров'я, зменшує працездатність, підвищує рівень небезпеки. Тому необхідно передбачати заходи захисту від шуму. А для цього потрібно володіти відповідними знаннями. Як правило, шум нас дратує: заважає працювати, відпочивати, думати. Але шум може впливати і позитивно. Такий вплив на людину чинить, наприклад, шелест листя дерев, помірний стукіт дощових крапель, рокіт морського прибою. Позитивний вплив спокійної приємної музики відомий з давніх часів. Тому різноманітні оздоровчі процедури супроводжуються спокійною симфонічною або блюзовою музикою.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [66]. За цими нормами рівень шуму не може перевищувати 65 Дб.

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією:

- зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму, замінюючи ударні технологічні процеси безударними, застосовуючи деталі із матеріалів з високим коефіцієнтом внутрішнього тертя (пластмаса, гума, деревина та ін), підшипники ковзання замість кочення, косозубі та шевронні зубчасті передачі замість прямозубих, проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;

- зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;

- зменшення шкідливої дії шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку.

Одним з найпростіших та економічно доцільних способів зниження шуму є застосування методів звукоізоляції та звукопоглинання.

### 5.2.5 Електромагнітні випромінювання

Ступінь впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності та тривалості дії, характеру випромінювання (непреривне чи модульоване), розміру опромінюваної поверхні тіла, індивідуальних особливостей організму.

ЕМП можуть викликати біологічні та функціональні несприятливі ефекти в організмі людини. Функціональні ефекти проявляються у передчасній втомлюваності, частих болях голови, погіршення сну, порушення ЦНС, порушення серцево-судинної системи. Присистематичному опроміненні ЕМП

спостерігаються перепади кров'яного тиску, сповільнення пульсу, нервово-психічні захворювання, деякі атрофічні явища. Сучасні дослідження вказують на те, що радіочастотне випромінювання, впливаючи на ЦНС, є вагомим чинником.

Умови праці при дії неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань відповідають 3 класу шкідливості при перевищенні на робочих місцях ГДР, що встановлені для відповідного часу дії, з урахуванням значень енергетичних експозицій в тих діапазонах частот, де вони нормуються, і 4 класу - при перевищенні максимальних ГДР для короткочасної дії. При одночасній дії на працівників неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань, що створюються декількома джерелами, які працюють у різних нормованих частотних діапазонах, клас умов праці на робочому місці встановлюється за фактором, що отримав найбільший ступінь шкідливості. При цьому, якщо виявлено перевищення ГДР у двох і більше нормованих частотних діапазонах, ступінь шкідливості збільшується на одну одиницю.[67]

Таблиця 5.4 - КЛАСИ умов праці при дії неіонізуючих електромагнітних випромінювань (перевищення ГДР, разів)

Показник виробничого середовища	Класи умов праці					
	допустимий - 2	шкідливий – 3				небезпечний - 4
		1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь	4 ступінь	
1	2	3	4	5	6	7
Постійне магнітне поле**	$\leq$ ГДР*	$\leq$ 5	$\leq$ 10	$\leq$ 50	$\geq$ 100	-
Електростатичне поле***	$\leq$ ГДР*	$\leq$ 3	$\leq$ 5	$\leq$ 10	$>$ 10	-
Електричні поля промислової частоти (50 Гц)**	$\leq$ ГДР*	$\leq$ 3	$\leq$ 5	$\leq$ 10	$>$ 10	$>$ 40
Магнітні поля промислової частоти (50 Гц)**	$\leq$ ГДР*	$\leq$ 5	$\leq$ 10	$\leq$ 50	$>$ 50	-
Електромагнітні поля радіочастотного діапазону**: 0,001-0,01 МГц	$\leq$ ГДР*	$\leq$ 3	$\leq$ 5	$\leq$ 10	$>$ 10	-



Продовження таблиці 5.4 - КЛАСИ умов праці при дії неіонізуючих електромагнітних випромінювань (перевищення ГДР, разів)

1	2	3	4	5	6	7
0,01-0,06 МГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	-
0,06-3,0 МГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	-
3,0-30,0 МГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	-
30,0-300,0 МГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	>100****
300,0 МГц - 300,0 ГГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	>100****
Імпульсні ЕМП в діапазоні частот 0-1000 МГц	≤ГДР*	≤3	≤5	≤10	>10	>100****

\* Значення ГДР, з якими порівнюються вимірювані на робочих місцях величини ЕМП, визначаються залежно від тривалості дії фактора протягом робочого дня.

\*\* Відповідно до [ДСН 3.3.6.096-2002](#).

\*\*\* Відповідно до «Санитарно-гигиенических норм допустимой напряженности электростатического поля», затверджених заступником Головного державного санітарного лікаря СРСР від 10 жовтня 1977 року №1757-77, та ГОСТ 12.1.045-84 «Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля».

\*\*\*\* Перевищення максимального значення ГДР за [ДСН 3.3.6.096-2002](#).

Для запобігання шкідливого впливу ЕМП застосовуються організаційні заходи колективного захисту від ЕМП:

- розміщення об'єктів, які випромінюють ЕМП таким чином, щоб звести до мінімуму можливе опромінення людей;
- «захист часом» - перебування персоналу в зоні дії ЕМП обмежується мінімально необхідним для проведення робіт часом;
- «захист відстанню» - віддалення робочих місць на максимально допустиму відстань від джерел ЕМП;
- «захист кількістю» - потужність джерел випромінювання повинна бути мінімально необхідною;
- виділення зон ЕМП відповідними знаками безпеки;
- проведення дозиметричного контролю.

### 5.2.6 Психофізіологічні фактори

Важкість та напруженість трудового процесу визначаються та оцінюються за показниками, що наведені в табл. 4

Важкість та напруженість праці визначаються за основними та допоміжними показниками, що є характерними для конкретного робочого місця.

Основними показниками важкості праці є: фізичне динамічне навантаження, стереотипні робочі рухи, статичне навантаження, переміщення у просторі.

Основними показниками напруженості праці є: тривалість зосередження уваги або щільність сигналів, ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб або ступінь відповідальності за життя інших осіб, змінність при роботі виключно в нічну зміну.

Гігієнічна оцінка важкості та напруженості праці проводиться шляхом додавання відношень виміряних або розрахованих показників до їх допустимих рівнів, помножених на коефіцієнт значимості показника (1,0 - для основних показників, 0,15 - для допоміжних).

Клас та ступінь важкості й напруженості праці визначаються відповідно до розрахованих балів (сума відношень основних та допоміжних показників до їх нормативних рівнів, помножених на відповідний коефіцієнт) згідно з табл. 5.5. Найвищі клас та ступінь за факторами «важкість» або «напруженість» трудового процесу - 3 клас, 3 ступінь (особливо важка або особливо напружена праця).[67]

Таблиця 5.5 - КЛАСИ умов праці за показниками напруженості праці

№ з/п	Показники напруженості трудового процесу	Класи умов праці			
		оптимальний (напруженість праці легкого ступеня)	допустимий (напруженість праці середнього ступеня)	шкідливий (напружена праця)	
		1	2	3.1	3.2
1	2	3	4	5	6
1*	Інтелектуальні навантаження				
1.1	Зміст роботи	Відсутня необхідність прийняття рішення	Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією	Рішення складних завдань з вибором за алгоритмом (робота за серією інструкцій)	Евристична (творча) діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму; особисте керівництво в складних ситуаціях
1.2	Сприймання сигналів (інформації) та їх оцінка	Сприймання сигналів, але немає потреби в корекції дій	Сприймання сигналів з наступною корекцією дій та операцій	Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів	Сприймання сигналів з наступною комплексною оцінкою взаємопов'язаних параметрів. Комплексна оцінка всієї виробничої діяльності
1.3	Розподіл функцій за ступенем складності завдання	Обробка та виконання завдання	Обробка, виконання завдання та його перевірка	Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання	Контроль та попередня робота з розподілу завдань іншим особам
1.4	Характер виконуваної роботи	Робота за індивідуальним планом	Робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності	Робота в умовах дефіциту часу	Робота в умовах дефіциту часу та інформації з підвищеною відповідальністю за кінцевий результат

## Продовження таблиці 5.5 - КЛАСИ умов праці за показниками напруженості праці

1	2	3	4	5	6
2	Сенсорні навантаження	-	-	-	-
2.1	Тривалість зосередження уваги (в % від часу зміни)	До 50	51-75	Більше 75	-
2.2	Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за 1 годину роботи	До 150	151-300	Більше 300	-
2.3	Навантаження на зоровий аналізатор	-	-	-	-
2.3.1	Розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни	Більше 5 мм 100% часу	5,0-1,1 мм більше 50% часу; 1,0-0,3 мм до 50 % часу; менше 0,3 мм до 25% часу	1,0-0,3 мм більше 50% часу; менше 0,3 мм 25-50% часу	Менше 0,3 мм більше 50% часу, у тому числі з використанням оптичних приладів
2.3.2	Спостереження за екранами відеотерміналів, годин на зміну	До 2	До 4	> 4,1-6	Більше 6
2.4	Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів)	Розбірливість слів та сигналів від 100% до 90%	Розбірливість слів та сигналів від 90% до 70%	Розбірливість слів та сигналів від 50% до 70%	Розбірливість слів та сигналів менше 50%
2.5	Навантаження на голосовий апарат, сумарна кількість годин, з напруженням голосового апарату протягом тижня	До 16	Від 16 до 20	Від 20 до 25	Більше 25

## Продовження таблиці 5.5 - КЛАСИ умов праці за показниками напруженості праці

1	2	3	4	5	6
3	Емоційне навантаження	-	-	-	-
3.1	Ступінь відповідальності за результати своєї діяльності. Значущість помилки	Є відповідальним за виконання окремих елементів завдання. Вимагає додаткових зусиль з боку працівника	Є відповідальним за функціональну якість допоміжних робіт (завдань). Вимагає додаткових зусиль з боку керівництва (бригадира, майстра тощо)	Є відповідальним за функціональну якість основної роботи (завдання). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади тощо)	Є відповідальним за функціональну якість кінцевої продукції, роботи, завдання. Неправильні рішення можуть призвести до пошкодження обладнання, зупинки технологічного процесу, можливої небезпеки для життя
3.2	Ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб	Виключений	-	-	Вірогідний
3.3	Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб	Виключений	-	Є відповідальним за безпеку	-
4	Монотонність навантажень	-	-	-	-
4.1	Кількість елементів (прийомів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово	Більше 10	10-6	5-2	-
4.2	Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються	Більше 100	100-25	24-2	-

Продовження таблиці 5.5 - КЛАСИ умов праці за показниками напруженості праці

1	2	3	4	5	6
4.3	Монотонність виробничої обстановки, час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни	Менше 75	76-90	91-95	-
5	Режим праці	-	-	-	-
5.1	Тривалість робочого дня, год.	6 або 7	8	Більше 8	-
5.2	Змінність роботи	Однозмінна робота (без нічної зміни)	Двозмінна робота (без нічної зміни)	Тризмінна робота (з роботою в нічну зміну)	Нерегулярна змінність з роботою в нічний час, робота виключно в нічну зміну**

Згідно з наведеними даними таблиці 4 при плануванні розпорядку робочого дня і навантаження на працівника потрібно враховувати всі умови оптимальних умов праці.

### 5.3 НС внаслідок аварій з викидом небезпечних хімічних речовин

Код 10300. На території України знаходиться 877 хімічно небезпечних об'єктів та 287000 об'єктів використовують у своєму виробництві небезпечні хімічні речовини або їх похідні (у 140 містах та 46 населених пунктах); зростання кількості промислових відходів становлять небезпеку для навколишнього середовища і людей; функціонує 1810 об'єктів господарювання, на яких зберігаються або використовуються у виробничому процесі понад 283 тис. т сильнодіючих отруйних речовин, у тому числі – 9,8 тис. т хлору, 178,4 тис. т аміаку; у зонах можливого хімічного зараження від хімічно небезпечних об'єктів проживає близько 20 млн. осіб.

Небезпечні хімічні речовини – це хімічні речовини, які при аварійному потраплянні в атмосферу або при бойовому застосуванні можуть заражати незахищених людей і тварин, повітря, місцевість, споруди, воду, різні предмети

й матеріали, що робить їх непридатними для користування і небезпечними при стиканні з ними.

Класифікацію небезпечних хімічних речовин (НХР) здійснюють за:

– ступенем токсичності при інгаляційному і пероральному надходженні до організму;

- ознакою переважного синдрому при гострій інтоксикації;
- агрегатним станом;
- температурою кипіння;
- здатністю до горіння;
- впливом на організм людини.

За ступенем токсичності всі хімічні речовини поділяють на:

- надзвичайно токсичні (з  $LC_{50} < 1$  мг/л і  $LD_{50} < 1$  мг/кг);
- високотоксичні (з  $LC_{50} = 1-5$  мг/л і  $LD_{50} = 1-50$  мг/кг);
- сильнотоксичні (з  $LC_{50} = 6-20$  мг/л і  $LD_{50} = 51-500$  мг/кг);
- помірнотоксичні (з  $LC_{50} = 21-80$  мг/л і  $LD_{50} = 501-5000$  мг/кг);
- малотоксичні (з  $LC_{50} = 81-160$  мг/л і  $LD_{50} = 5001-15000$  мг/кг);
- нетоксичні (з  $LC_{50} > 160$  мг/л і  $LD_{50} > 15000$  мг/кг).

Особливу небезпеку становлять хімічні речовини, які залежно від їх практичного використання можна поділити на:

– промислові отрути, які використовуються у виробництві (розчинники, барвники) є джерелом небезпеки гострих і хронічних інтоксикацій при порушенні правил безпеки (наприклад, ртуть, свинець, ароматичні сполуки тощо);

– отрутохімікати, що використовуються в сільському господарстві для боротьби з бур'янами та гризунами (гербіциди, пестициди);

– лікарські препарати;

– побутові хімічні речовини, які використовуються як харчові добавки, засоби санітарії, особистої гігієни, косметичні засоби;

– хімічна зброя.

НХР поділяються на чотири класи безпеки:

- I – надзвичайно небезпечні;
- II – високонебезпечні;
- III – помірно небезпечні;
- IV – малонебезпечні речовини.



## ВИСНОВКИ

На підставі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки:

У технології MEMS найбільш помітними елементами є мікросенсори та мікроприводи, які відповідним чином класифікуються як перетворювачі. Ці перетворювачі перетворюють енергію з однієї форми в іншу. У випадку мікросенсорів пристрій зазвичай перетворює виміряний механічний сигнал в електричний сигнал, а мікропривід перетворює електричний сигнал у механічний вихід.

Найбільш розпоширенішими з MEMS-сенсорів є датчики руху. Вони останнім часом дуже широко застосовуються це телефони, комунікатори, ігрові приставки, фотокамери та ноутбуки все частіше і частіше постачаються акселерометрами (датчиками прискорення) та гіроскопами (датчиками повороту), тому цим пристроям буде присвячена дана магістерська кваліфікаційна робота.

У другому розділі запропоновано новий фільтр AHRS предиктор-коректор, що використовує окремі кроки корекції для магнітометра та акселерометра (SCF) та його швидшу версію (FSCF). Обидва фільтри мають нижчу обчислювальну вартість, ніж інші добре відомі методи в цій галузі. Хоча обидва фільтри мають прості структури, було продемонстровано, що вони більш точні, ніж їхні конкуренти. Найбільш помітне покращення спостерігалось в сценарії з повільними обертаннями (77% середня абсолютна похибка другого найкращого фільтра), але воно покращує динамічне прискорення, а також швидкі обертання. Ключовою відмінністю від попередніх підходів є застосування функції корекції незалежно до даних акселерометра та магнітометра перед їх злиттям. Це відкриває можливості для майбутніх досліджень, наприклад, он-лайн адаптації ваг.

У третьому розділі, щоб підвищити точність кута орієнтації SINS, була запропонована схема синхронного збору даних для виконання синхронізації акселерометра та гіроскопа. У процесі зміни прискорення цей метод був сприятливим для корекції та компенсації кута орієнтації. Крім того, щоб покращити продуктивність QVBA в SINS, запропоновано вдосконалений метод вимірювання частоти рівної точності, який зробив точність вибірки QVBA точнішою. Крім того, ми запровадили новий FPU для покращення швидкості обчислення значення вимірювання частоти. Запропоновані методи перевірені експериментально. Показано, що точність кута огляду була покращена.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. <https://circuitdigest.com/tutorial/what-is-mems-various-mems-devices-and-applications>
2. Stract A.B. and S. Ample, Tech. Digest IEDM 2012, PP. 200-205.
3. <http://zet.instel.ru/articles/8872/>
4. Hsu, Tai-Rai (2002). MEMS & Micosystems. Design and Manufacture. Mac Graw Hill Higher Education. Boca Raton, FL.
5. <https://3dnews.ru/600098>
6. Kivilä, J.; Martinsuo, M.; Vuorinen, L. Sustainable Project Management through Project Control in Infrastructure Projects. *Int. J. Proj. Manag.* 2017, 35, 1167–1183.
7. <https://3dnews.ru/editorial/mems-mikroelektromehhanicheskie-sistemi-chast-2>
8. Gunduz, M.; Ahsan, B. Construction Safety Factors Assessment through Frequency Adjusted Importance Index. *Int. J. Ind. Ergon.* 2018, 64, 155–162.
9. <https://3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectromechanicalsystems-Part-3>
10. Pinto, A.; Nunes, I.L.; Ribeiro, R.A. Occupational Risk Assessment in Construction Industry—Overview and Reflection. *Saf. Sci.* 2011, 49, 616–624.
11. Rotilio, M. Technology and resilience in the reconstruction process. A case study. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2020, XLIV-3/W1-2020, 117–123.
12. Ringen, K.; Seegal, J.; England, A. Safety and Health in the Construction Industry. *Annu. Rev. Public Health* 1995, 16, 165–188.
13. Henriques, V.; Malekian, R. Mine Safety System Using Wireless Sensor Network. *IEEE Access* 2016, 4, 3511–3521.
14. Wu, F.; Redoute, J.-M.; Yuce, M.R. WE-Safe: A Self-Powered Wearable IoT Sensor Network for Safety Applications Based on LoRa. *IEEE Access* 2018, 6, 40846–40853.
15. Leoni, A.; Colaiuda, D.; Pantoli, L.; Errico, V.; Santoro, A.S.; Saggio, G. Sensor and Actuator Electronic System for Active Hand Pose Sensing. In *AISEM Annual Conference on Sensors and Microsystems*; Springer: Cham, Switzerland, 2023; Volume 918, pp. 289–294. *Sensors* 2022, 22, 8685 18 of 21
16. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadersh. Manag. Eng.* 2011, 11, 241–252.
17. Rotilio, M.; Tudini, B. The role of digitization in post-disaster reconstruction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2020, XLIV-3/W1-2020, 125–130.
18. Paolucci, R.; Mutillo, M.; di Luzio, M.; Alaggio, R.; Ferri, G. Electronic Sensory System for Structural Health Monitoring Applications. In *Proceedings*

- of the 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2020, Split, Croatia, 23–26 September 2020.
19. Ishikawa, K.I.; Mita, A. Time Synchronization of a Wired Sensor Network for Structural Health Monitoring. *Smart Mater. Struct.* 2008, 17, 015016.
  20. Markley, F.L.; Mortari, D. Quaternion attitude estimation using vector observations. *J. Astronaut. Sci.* 2000, 48, 359–380.
  21. Admiraal, M.; Wilson, S.; Vaidyanathan, R. Improved formulation of the IMU and MARG orientation gradient descent algorithm for motion tracking in human-machine interfaces. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Daegu, Korea, 16–18 November 2017; pp. 403–410.
  22. Zmitri, M.; Fourati, H.; Vuillerme, N. Human Activities and Postures Recognition: From Inertial Measurements to Quaternion-Based Approaches. *Sensors* 2019, 19, 4058.
  23. Madgwick, S.O.; Harrison, A.J.; Vaidyanathan, R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In *Proceedings of the Rehabilitation Robotics (ICORR) 2011 IEEE International Conference*, Zurich, Switzerland, 29 June–1 July 2011; pp. 1–7.
  24. Wu, J.; Zhou, Z.; Fourati, H.; Cheng, Y. A super fast attitude determination algorithm for consumer-level accelerometer and magnetometer. *IEEE Trans. Consum. Electron.* 2018, 64, 375–381.
  25. Liu, F.; Li, J.; Wang, H.; Liu, C. An improved quaternion Gauss–Newton algorithm for attitude determination using magnetometer and accelerometer. *Chin. J. Aeronaut.* 2014, 27, 986–993.
  26. Zhang, J.; He, T.; Sra, S.; Jadbabaie, A. Why Gradient Clipping Accelerates Training: A Theoretical Justification for Adaptivity. In *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*, New Orleans, LA, USA, 6–9 May 2019.
  27. Suh, Y.S. Simple-Structured Quaternion Estimator Separating Inertial and Magnetic Sensor Effects. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2019, 55, 2698–2706.
  28. Merriaux, P.; Dupuis, Y.; Bouteau, R.; Vasseur, P.; Savatier, X. A study of vicon system positioning performance. *Sensors* 2017, 17, 1591.
  29. Wilson, S.; Eberle, H.; Hayashi, Y.; Madgwick, S.O.; McGregor, A.; Jing, X.; Vaidyanathan, R. Formulation of a new gradient descent MARG orientation algorithm: Case study on robot teleoperation. *Mech. Syst. Signal Process.* 2019, 130, 183–200.

30. Fan, B.; Li, Q.; Liu, T. Improving the accuracy of wearable sensor orientation using a two-step complementary filter with state machine-based adaptive strategy. *Meas. Sci. Technol.* 2018, 29, 115104.
31. Markley, F.L.; Crassidis, J.L. *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*; Springer: Berlin, Germany, 2014; Volume 33.
32. Windolf, M.; Götzen, N.; Morlock, M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—Exemplified on the Vicon-460 system. *J. Biomech.* 2008, 41, 2776–2780.
33. Mahony, R.; Hamel, T.; Pflimlin, J.M. Complementary filter design on the special orthogonal group SO (3). In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC-ECC'05)*, Seville, Spain, 15 December 2005; pp. 1477–1484.
34. Valenti, R.; Dryanovski, I.; Xiao, J. Keeping a good attitude: A quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs. *Sensors* 2015, 15, 19302–19330.
35. Odry, Á.; Kecskes, I.; Sarcevic, P.; Vizvari, Z.; Toth, A.; Odry, P. A Novel Fuzzy-Adaptive Extended Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation of Mobile Robots. *Sensors* 2020, 20, 803.
36. Coope, I.D.; Price, C.J. On the convergence of grid-based methods for unconstrained optimization. *SIAM J. Optim.* 2001, 11, 859–869.
37. Zhi, W.; Chu, J.; Li, J.; Wang, Y. A Novel Attitude Determination System Aided by Polarization Sensor. *Sensors* 2018, 18, 158.
38. Lee, C.; Dao, N.; Jang, S.; Kim, D.; Kim, Y.; Cho, S. Gyro Drift Correction for An Indirect Kalman Filter Based Sensor Fusion Driver. *Sensors* 2016, 16, 864.
39. Inoue, R.; Terra, M.; Cerri, J. Extended robust Kalman filter for attitude estimation. *IET Control Theory Appl.* 2016, 10, 162–172.
40. Li, J.; Wei, X.; Zhang, G. An Extended Kalman Filter-Based Attitude Tracking Algorithm for Star Sensors. *Sensors* 2017, 17, 1921.
41. Gao, W.; Zhang, Y.; Wang, J. A Strapdown Inertial Navigation System/Beidou/Doppler Velocity Log Integrated Navigation Algorithm Based on a Cubature Kalman Filter. *Sensors* 2014, 14, 1511–1527.
42. Hong, D.; Liu, G.; Chen, H.; Deng, C. Application of EKF for Missile Attitude Estimation based on SINS/CNS Integrated Guidance System and Control in Aeronautics and Astronautics. In *Proceedings of the 2010 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics*, Harbin, China, 8–10 June 2010; pp. 1101–1104.
43. Changey, S.; Beauvois, D.; Fleck, V. A mixed extended-unscented filter

- for attitude estimation with magnetometer sensor. In Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, MN, USA, 14–16 June 2006; p. 6.
44. Lin, M.; Chen, D.; Bi, S.; Chen, W.; Yao, W.; Huang, Q.; Zeng, X. An improved attitude information fusion algorithm based on particle filtering. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, Nanjing, China, 26–29 May 2013; pp. 367–372.
  45. Wang, B.; Xiao, X.; Xia, Y.; Fu, M. Unscented Particle Filtering for Estimation of Shipboard Deformation Based on Inertial Measurement Units. *Sensors* 2013, *13*, 15656–15672.
  46. Duong, D.Q.; Sun, J.; Nguyen, T.P.; Luo, L. Attitude estimation by using MEMS IMU with Fuzzy Tuned Complementary Filter. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, China, 20–22 August 2016; pp. 372–378.
  47. Yoo, T.S.; Hong, S.K.; Yoon, H.M.; Park, S. Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System. *Sensors* 2011, *11*, 3816–3830.
  48. Valenti, R.G.; Dryanovski, I.; Xiao, J. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs. *Sensors* 2015, *15*, 19302–19330.
  49. Sabatini, A.M.; Genovese, V. A Sensor Fusion Method for Tracking Vertical Velocity and Height Based on Inertial and Barometric Altimeter Measurements. *Sensors* 2014, *14*, 13324–13347.
  50. Tayebi, A.; McGilvray, S. Attitude stabilization of a VTOL quadrotor Aircraft. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2006, *14*, 562–571.
  51. Magnis, L.; Petit, N. Angular Velocity Nonlinear Observer from Single Vector Measurements. *IEEE Trans. Autom. Control* 2016, *61*, 2473–2483.
  52. Euston, M.; Coote, P.; Mahony, R.; Hamel, T. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 22–26 September 2008; pp. 340–345.
  53. Baerveldt, A.J.; Klang, R. A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter. In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Budapest, Hungary, 15–17 September 1997; pp. 391–395.
  54. Mahony, R.; Hamel, T.; Pflimlin, J. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. *IEEE Trans. Autom. Control* 2008, *53*, 1203–

- 1218.
55. Xu, Y.; Li, K.; Yang, G.; He, M. Error Modeling and Compensation for Rotation-Modulation Strapdown Inertial Navigation System. *Adv. Sci. Lett.* 2012, 5, 981–985.
  56. Yang, H.; Li, W.; Luo, C.; Zhang, J.; Si, Z. Research on Error Compensation Property of Strapdown Inertial Navigation System Using Dynamic Model of Shearer. *IEEE Access* 2017, 4, 2045–2055
  57. Traon, O.; Janiaud, D.; Pernice, M.; Masson, S.; Muller, S.; Tridera, J. A New Quartz Monolithic Differential Vibrating Beam Accelerometer. In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium, San Diego, CA, USA, 25–27 April 2006; pp. 6–15.
  58. Levy, R.; Janiaud, D.; Guerard, J.; Taibi, R.; Traon, O. A 50 nano-g resolution quartz Vibrating Beam Accelerometer. In Proceedings of the International Symposium on Inertial Sensors and Systems, Laguna Beach, CA, USA, 25–26 February 2014; pp. 1–4.
  59. Xu, H.; Kim, H.; Kim, H. A direct measurement method of frequency responses of the smart power IC. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010, 59, 682–686.
  60. Sondkar, S.; Dudhane, S.; Abhyankar, H. Frequency measurement methods by signal processing techniques. *Procedia Eng.* 2012, 38, 2590–2594.
  61. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
  62. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
  63. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
  64. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
  65. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)
  66. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
  67. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості

та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14.\\_nakazy\\_ta\\_rozpor\\_183575/248+58074-detail.html](http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html)



Додаток А  
(обов'язковий)

## ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

### MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРИ ТА ГІРОСКОПИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Клювак Клювак В.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., проф. каф. ІРТС

Осадчук Осадчук В.С.  
(прізвище та ініціали)

«30» 12 2022 р.

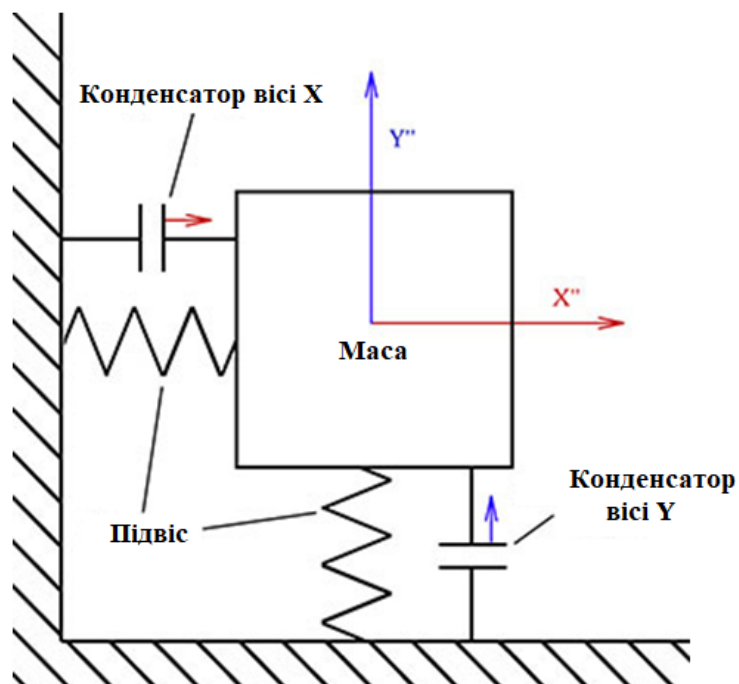


Рисунок 1 – Основний принцип роботи конденсаторних акселерометрів

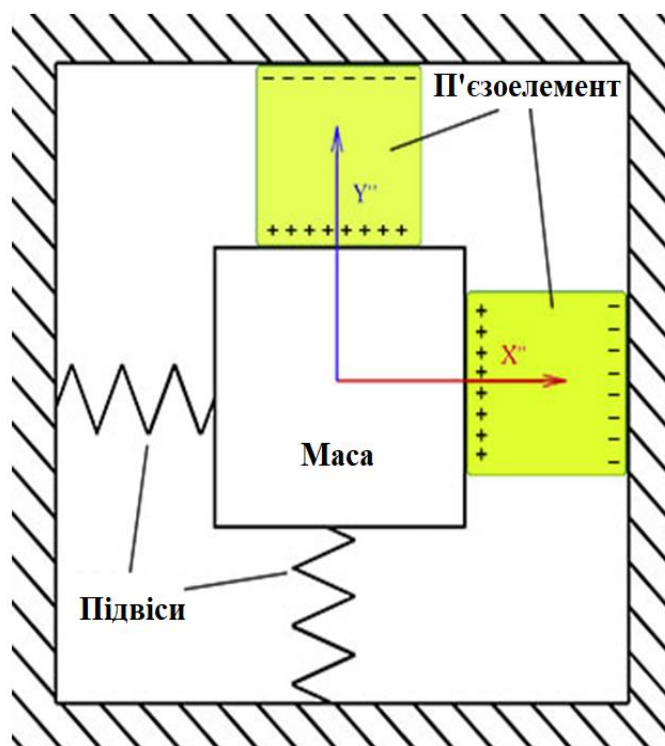


Рисунок 2 – Основний принцип роботи акселерометрів на п'єзоелементах

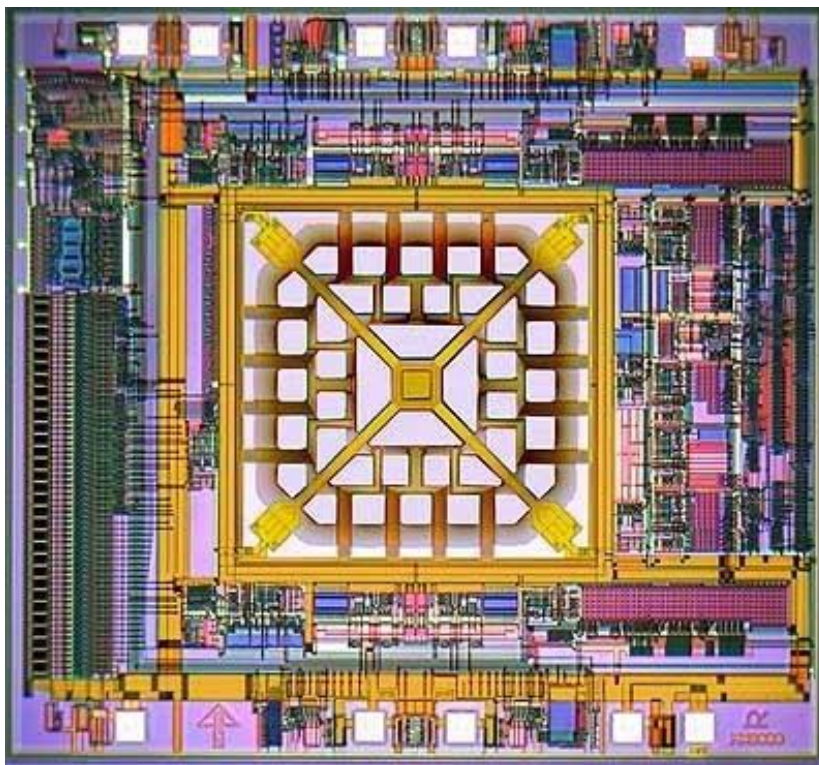


Рисунок 3 – Двохосний термальний акселерометр

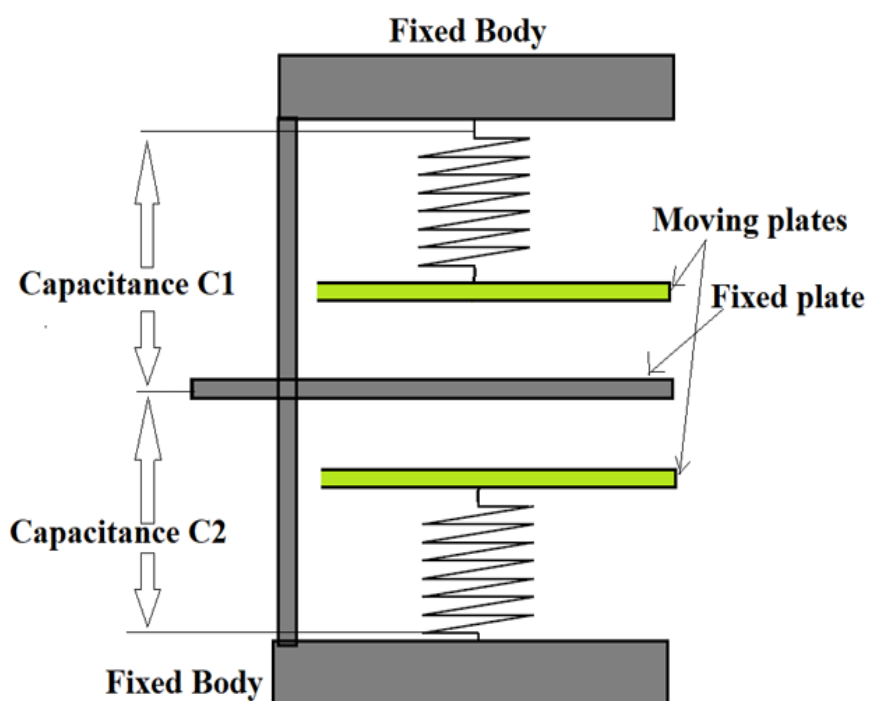


Рисунок 4 – Схематичне зображення ємнісного MEMS акселерометра

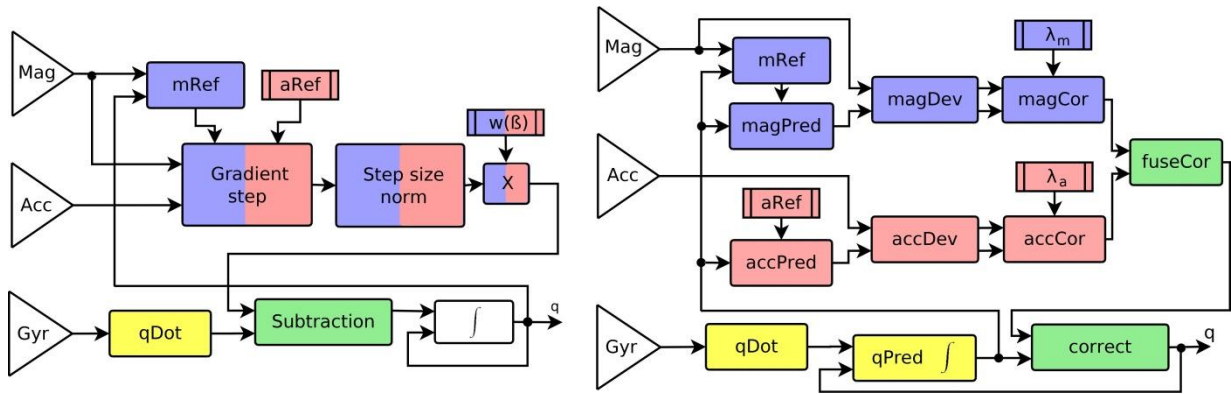


Рисунок 5 – Блок-схема фільтра комбінації датчика магнітної кутової швидкості та гравітації (MARG) Маджвіка (ліворуч) і запропонованого розділеного коригувального фільтра (SCF) (праворуч). Жовті блоки позначають передбачення від гіроскопа; Сині блоки позначають поправку від магнітометра; Червоний блокує корекцію акселерометра, а зелений означає злиття кроків корекції та її застосування до прогнозованих значень.

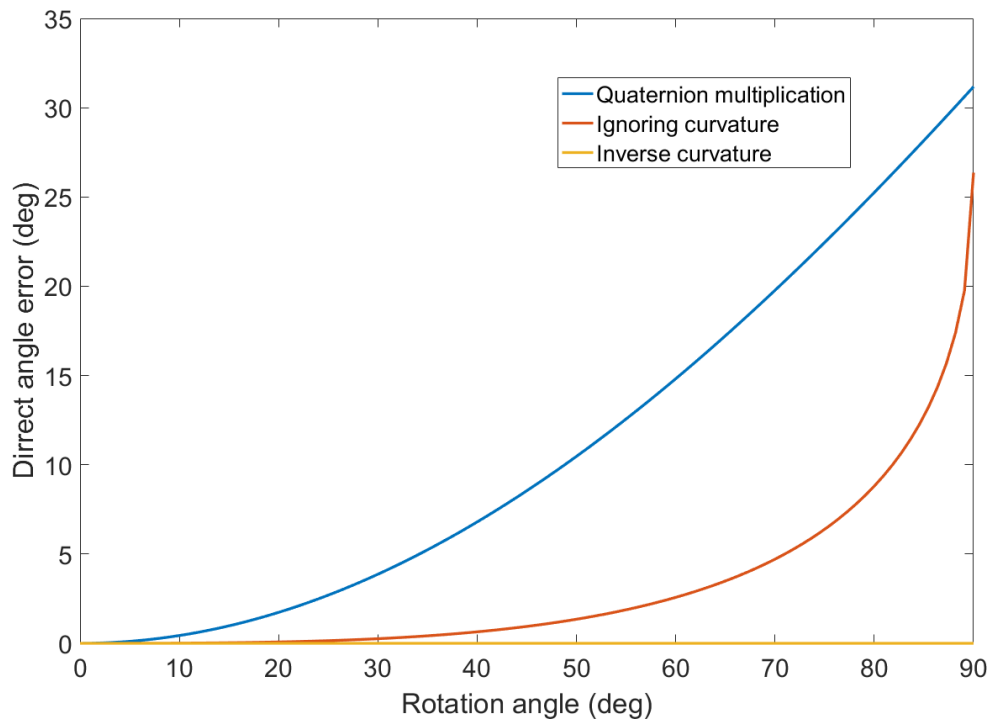


Рисунок 6 – Точність злиття кватерніонів двох обертів перпендикулярних напрямків з однаковим значенням кута повороту для кватерніонного множення (синій), запропонований метод з оберненою квадратурою (2.24) (жовтий) і спрощений метод (2.25), ігноруючи кривизну (червоний)

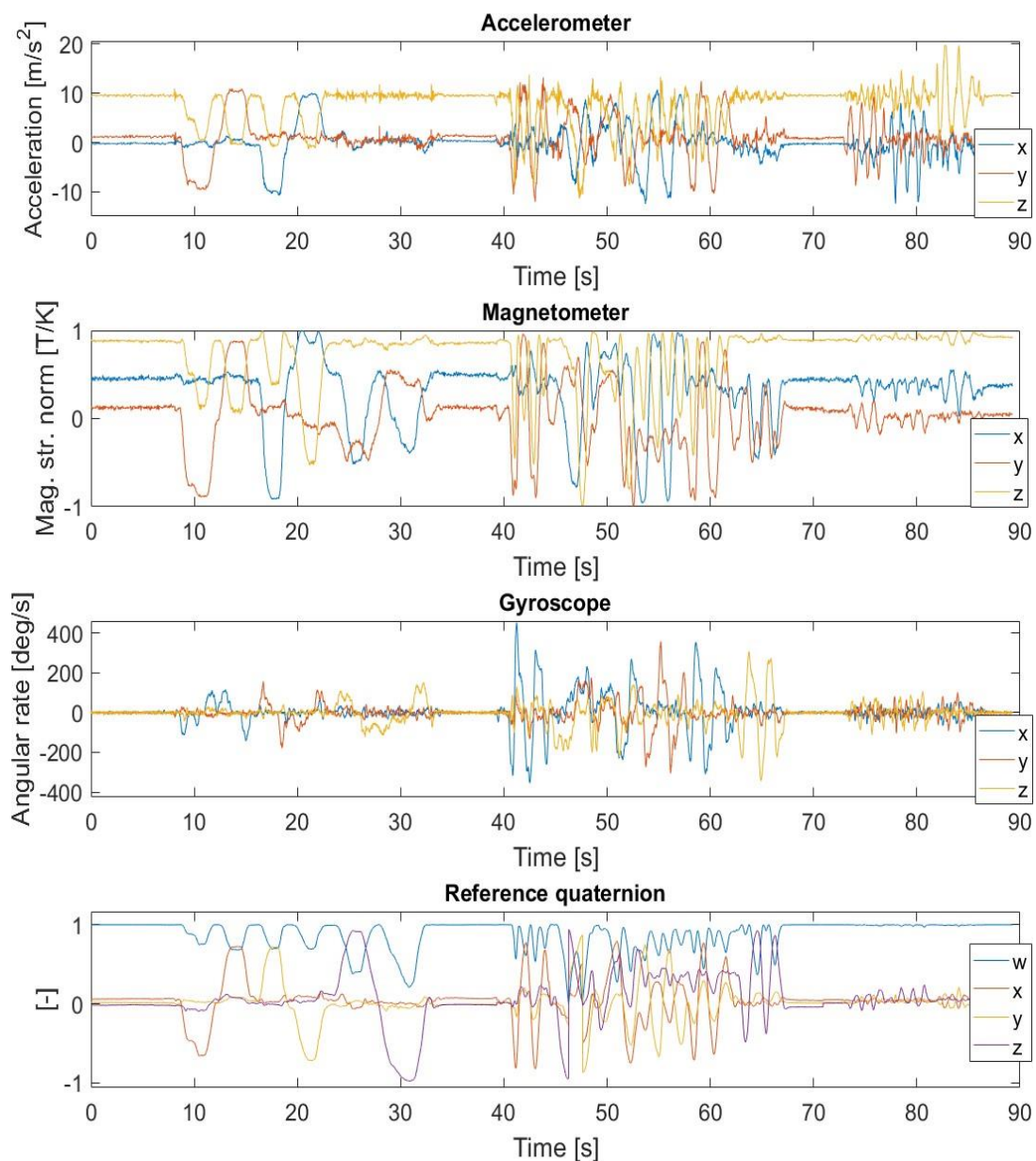


Рисунок 7 – Вимірні дані з усіх трьох експериментів. Перші три рядки відображають дані з Датчик MARG: усі три осі, x, y, z, акселерометра, магнітометра та гіроскопа відповідно. Вимірні позиції точок на платформі з системи VICON були перетворені в еталонний кватерніон, який відображається через компоненти вектора, w, x, y, z



Таблиця 1 – Помилки оцінки перевірених фільтрів для всіх перевірених сценаріїв. Параметри всіх фільтрів були оптимізовані для найкращої продуктивності

Тип фільтра	MAE [град]			RMSE [град]		
	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Маджвік	2,65	4,65	3,91	3,47	6,51	5,82
Валенті	2,74	5,93	4,53	3,85	7,17	6,41
Сух	5,39	10,59	11,43	6,41	15,12	15,62
Го	2,61	4,41	3,95	3,51	6,42	5,79
SCF	<b>1,96</b>	<b>4,05</b>	<b>3,35</b>	<b>3,02</b>	<b>6,25</b>	<b>5,6</b>
FSCF	<b>1,96</b>	<b>4,05</b>	<b>3,35</b>	<b>3,02</b>	<b>6,25</b>	<b>5,6</b>

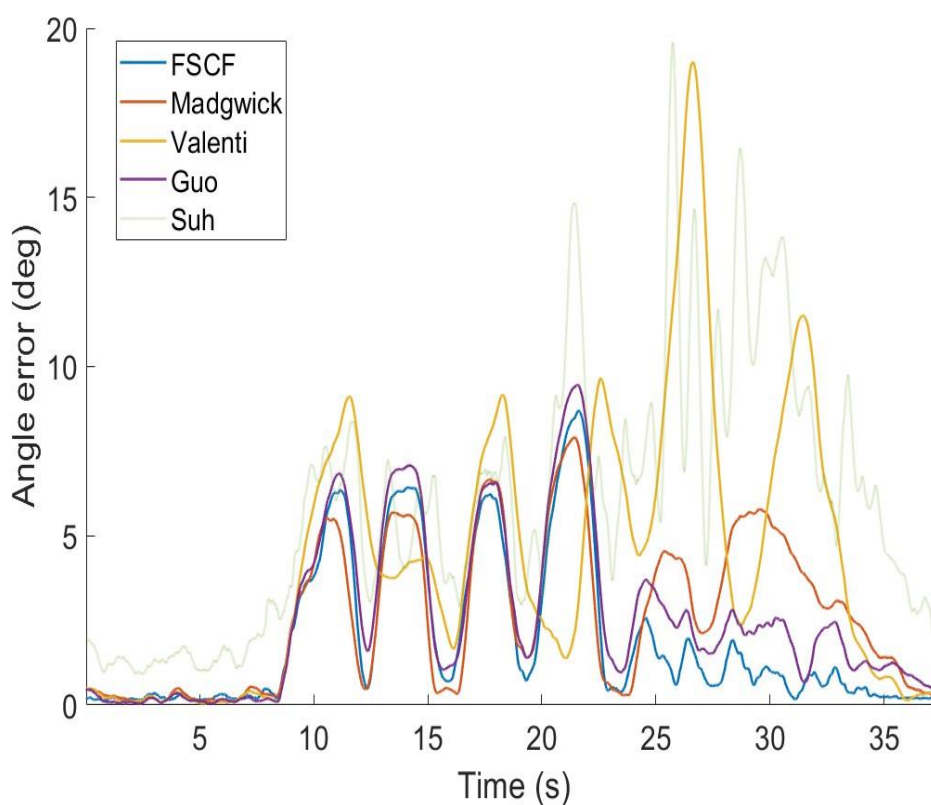


Рисунок 8 – Помилка перевірених фільтрів для даних з першого сценарію. Параметри всіх фільтрів були налаштовані для найкращої загальної продуктивності (сценарій 3)

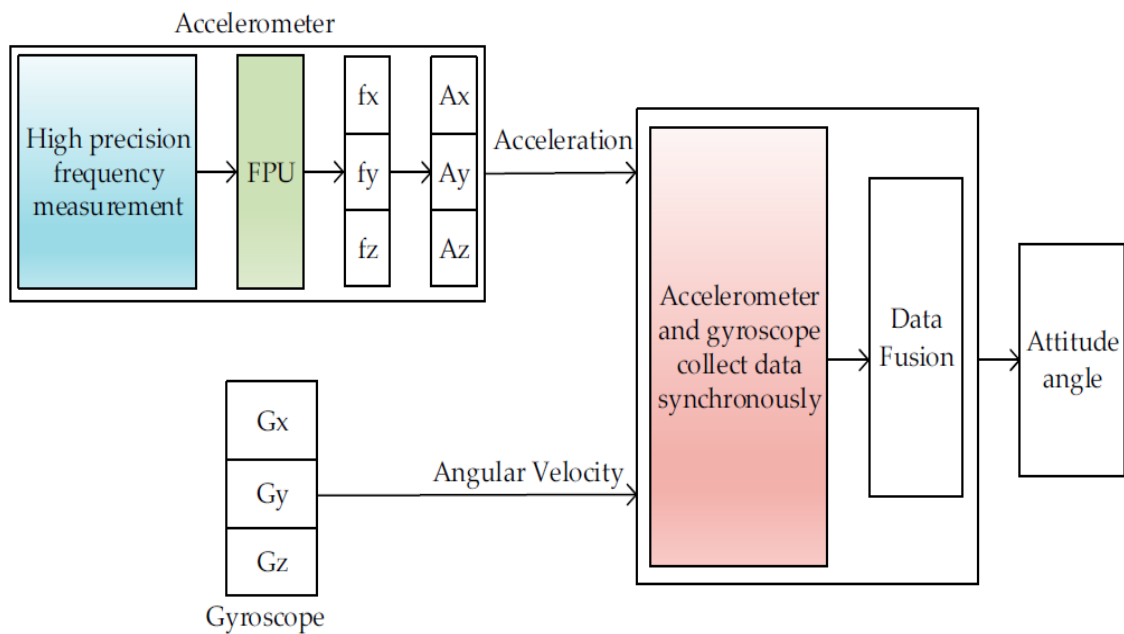


Рисунок 9 – Блок схема розробленої системи

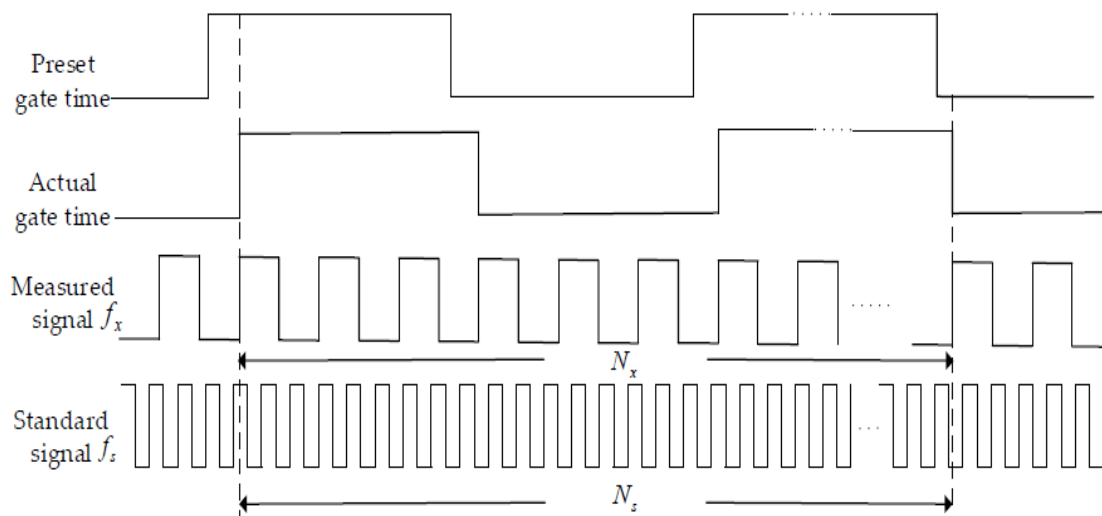


Рисунок 10 – Часова діаграма рівночного методу вимірювання частоти



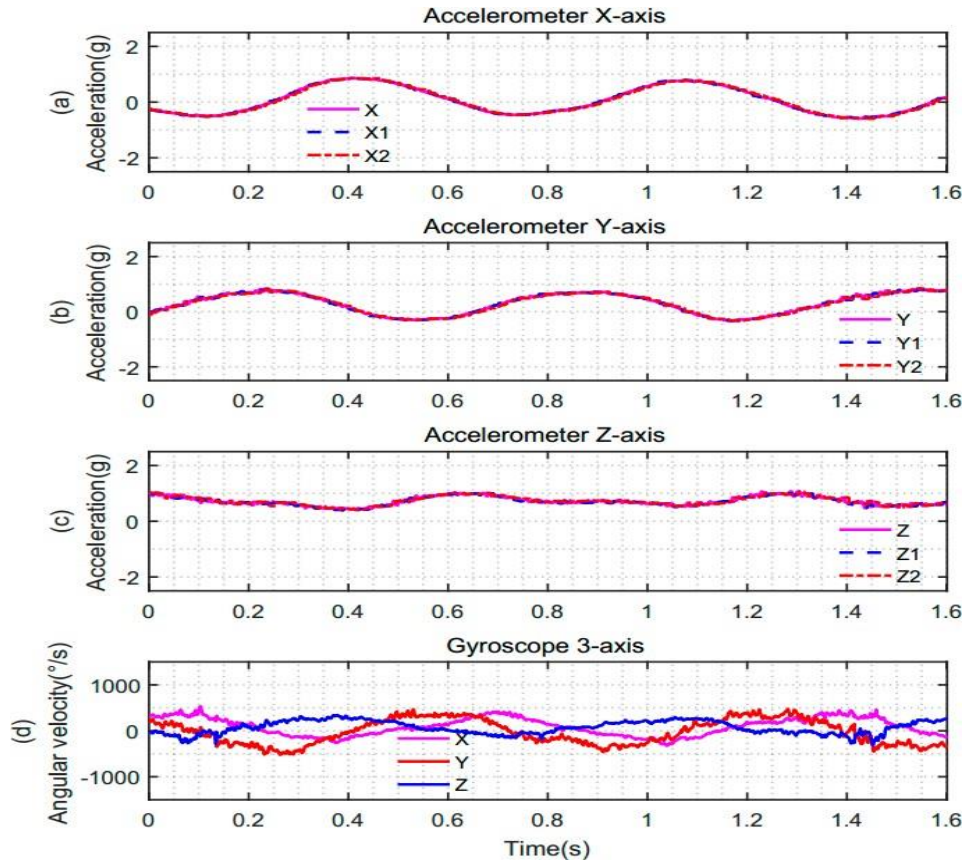


Рисунок 11 – Дані акселерометра і гіроскопа. (a) Дані осі X акселерометра; (b) Дані осі Y акселерометра; (c) дані осі Z акселерометра; (d) дані трьох осей гіроскопа

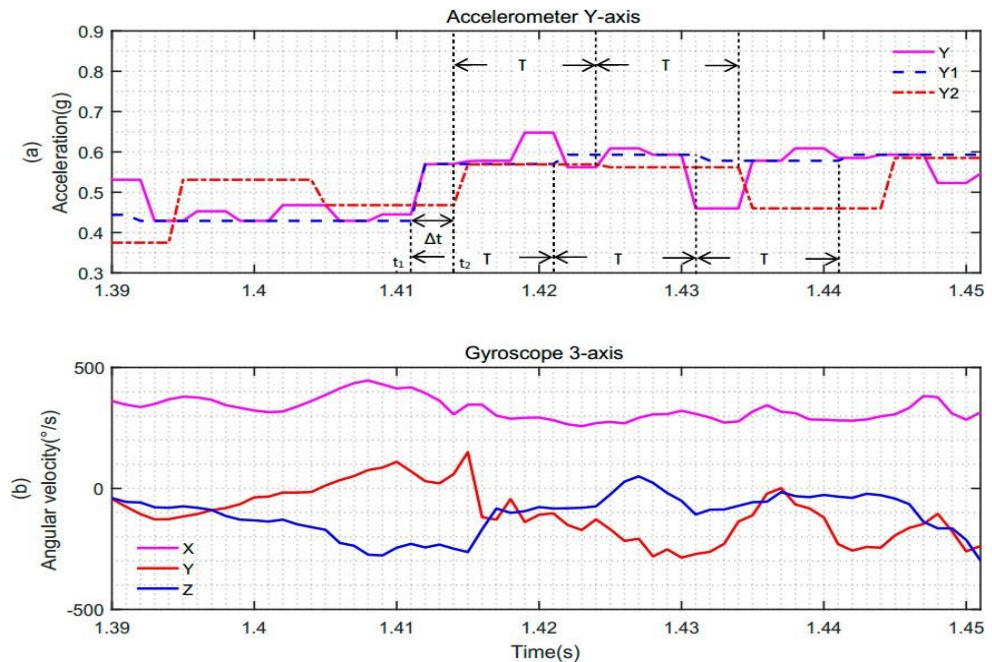


Рисунок 12 – Порівняння моментів дискретизації акселерометра та гіроскопа у випадку синхронної та асинхронної дискретизації. (a) Дані осі Y акселерометра; (b) дані трьох осей гіроскопа.

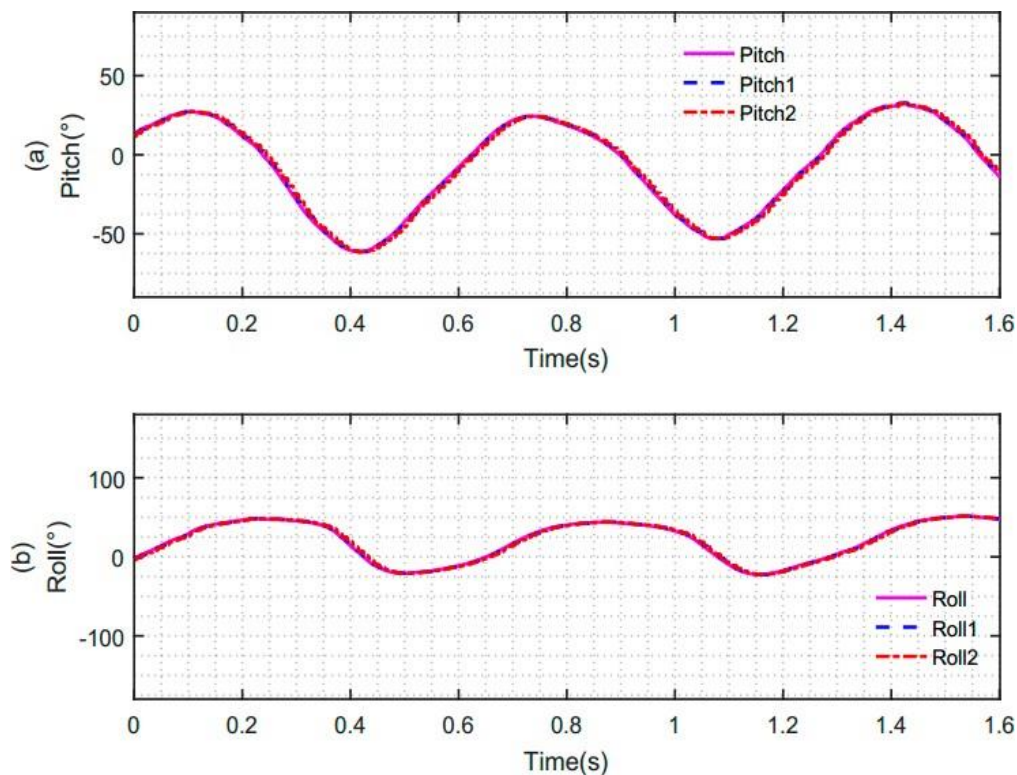


Рисунок 13 – Кут орієнтації, отриманий шляхом злиття даних акселерометра та гіроскопа. (а) Кут тангажу, отриманий шляхом злиття акселерометра та гіроскопа за різних умов; (б) кут крену, отриманий шляхом злиття акселерометра та гіроскопа за різних умов

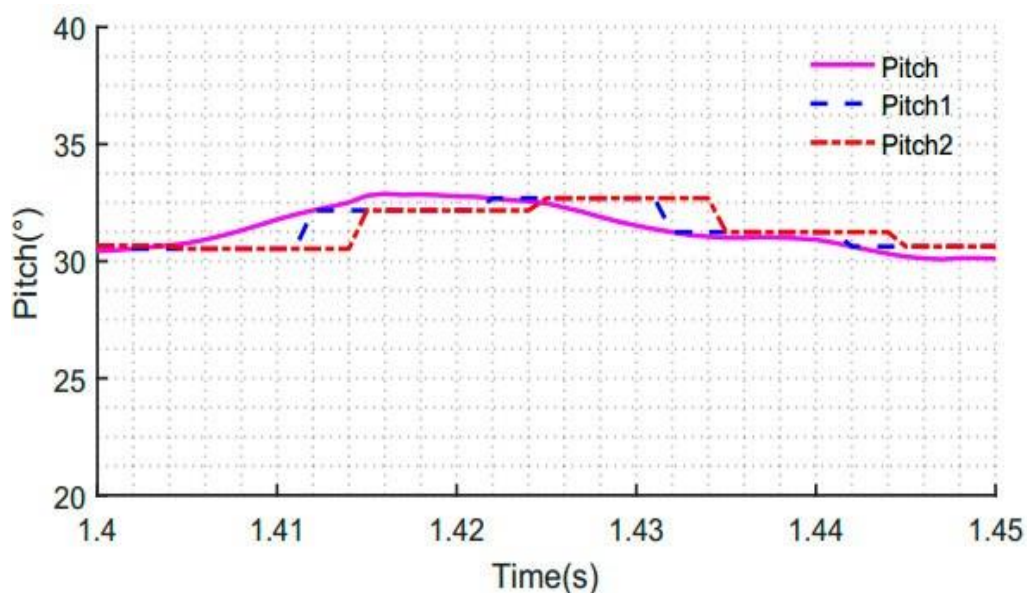


Рисунок 14 – Частково збільшений кут нахилу, отриманий шляхом злиття даних акселерометра та гіроскопа

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**  
**MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРИ ТА ГІРОСКОПИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ**  
**СИСТЕМ**

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «MEMS акселерометри та гіроскопи для робототехнічних систем»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

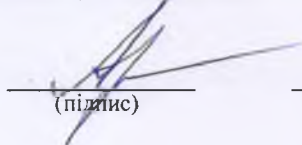
**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 96,22% Схожість 3,78%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Звягін О.С.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

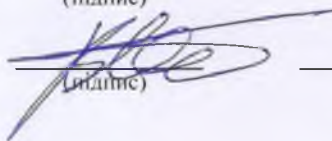
Автор роботи

  
(підпис)

Клювак В. М.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук В. С.

(прізвище, ініціали)