

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Кафедра аерокосмічних систем управління**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор Тачиніна О. М.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021р.

# **ДИПЛОМНА РОБОТА**

**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ  
“БАКАЛАВР”**

**Тема:** \_\_\_\_\_

**Виконавець:** \_\_\_\_\_

**Керівник:** \_\_\_\_\_

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**Нормоконтролер: Дивнич Микола Полікарпович**

**Київ 2021**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор Тачиніна О. М.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Бентковського Гліба Олаговича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

**1.Тема дипломної роботи (проекту):** Неортогональний інерціальний вимірювач кутової швидкості на основі МЕМС гіроскопів

затверджена наказом ректора від “” 2021 р. №584/ст.

**2.Термін виконання роботи (проекту):** з по.

**3.Вихідні дані до роботи (проекту):** дослідження має теоретичний і практичний характер, виконане на основі аналізу літературних та Інтернет-джерел.

**4.Зміст пояснювальної записки:**

**Вступ.**

**Розділ 1:** описує конструкцію сучасних МЕМС гіроскопів.

**Розділ 2:** розповідає про переваги надмірності даних датчиків та особливості розташування вимірювальних пристроїв.

**Розділ 3:** описує методи оцінки точності мікро механічних гіроскопів.

**5.Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:**  
схеми з описом принципу роботи МЕМС гіроскопів, графіки, перехідних процесів кутової швидкості.

## 6. Календарний план-графік

<b>№ п/п</b>	<b>Завдання</b>	<b>Термін виконання</b>	<b>Відмітка про виконання</b>
1	Огляд літературних джерел.	25.03.2021-03.04.2021	
2	Постановка задачі.	15.04.2021	
3	Аналіз особливостей неортогонального інерційного вимірювача кутової швидкості	30.04.2021	
4	Створення першого та другого розділів диплому	18.05.2021	
5	Створення третього розділу диплому	29.05.2021	
6	Підбиття підсумків роботи	05.06.2021	
7	Підготовка презентації та отримання рецензій.	08.06.2021-16.06.2021	

7.Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_

Сущенко О.А.

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

Бентковський Г.О.

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до диплому на тему «Неортогональний інерційний вимірювач кутової швидкості на основі МЕМС гіроскопів» містить: сторінок, 28 малюнків та 25 посилань.

Ключові слова: МЕМС-ДАТЧИК, КУТОВА ШВИДКІСТЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ГІРОСКОПИ, НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ, НАДМІРНІСТЬ ВИМІРЮВАЧІВ, НЕОРТОГОНАЛЬНІСТЬ, ІНЕРЦІЙНИЙ ДАТЧИК.

**Метою дипломної роботи:** є аналіз ринку сучасних рішень МЕМС гіроскопів, визначення особливостей у будові та проектуванні датчиків кутової швидкості, дослідження точності неортогональних вимірювачів.

**Об'єктом дослідження:** є неортогональний інерційний вимірювач кутової швидкості на основі МЕМС гіроскопу.

**Предметом дослідження:** є похибки вимірювань, особливості конструкції та проектування неортогональних інерційних датчиків.

**Методологічний фундамент** базується на надмірних неортогональних векторних параметрах, мікро механічних датчиках кутової швидкості й принципах орієнтації в навігаційному просторі.

У даній дипломній роботі були розглянуті переваги та недоліки конструкції, проектування мікро механічних гіроскопів. Розглянуто питання надмірності ортогональних вимірювальних пристроїв для підвищення точності та надійності. Також було проведене дослідження точності експериментально та теоретично у ході якого було з'ясовано оптимальний тип конфігурації датчиків.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. РОЗГЛЯД СУЧАСНИХ МЕМС ГІРОСКОПІВ ДЛЯ НАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ. ....	8
1.1. Принцип дії та класифікація МЕМС гіроскопів.....	8
1.2. Технологічні особливості та <b>приклад</b> сучасних МЕМС гіроскопів	13
1.3. Висновки щодо структури та характеристик сучасних МЕМС гіроскопів	20
2. ОСОБЛИВОСТІ КОНФІГУРАЦІЙ НАДМІРНИХ НЕОРТОГОНАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ МЕМС ГІРОСКОПІВ.	21
2.1. Комплексний аналіз надмірних векторних вимірювачів.....	21
<b>2.2.</b> Орієнтація у надмірному вимірювальному просторі.....	22
<b>2.3.</b> Висновок .....	30
3. ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ.....	32
3.1. Динамічне дослідження точності інерційних вимірювальних пристроїв	32
<b>3.2.</b> Теоретичне оцінювання точності.....	35
<b>3.3.</b> Експериментальне оцінювання точності.....	38
<b>3.4.</b> Висновок .....	43
ВИСНОВОК.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ДЖЕРЕЛ .....	45

## ВСТУП

Завдяки розвитку мікро електроніки стало можливо реалізувати точні та компактні вимірювальні пристрої, яким знайшли застосування у самих різних сферах від авіації та навігації до систем безпеки та датчиків у смартфонах.

MEMS гіроскопи представляють із себе вимірювальні пристрої із вимірювальними елементами наступних типів дискові, камертоні, резонансні та п'єзоелектричні . Робота більшості вимірювачів заснована на ефекті Коріоліса.

Сучасний ринок мікро механічних гіроскопів має різні рішення як за особливості компонування та конструкції, так і за технологіями виготовлення вимірювальних елементів.. Лідерами виробництва у цій сфері є так компанії як Analog Devices, BEI Systron Donner, Bosch, Melexis та Silicon Sensing System.

Враховуючи різні можливості застосування MEMS гіроскопів необхідно гарантувати дійсність вимірюваних параметрів, для вирішення цієї проблеми використовують надмірність. Надмірність забезпечує не тільки підвищення точності виміряних даних, але й підвищення стійкості до відмови.

У ході роботи було оцінено експериментально та теоретично точність інерційного датчика. Було розглянуто різні варіанти конфігурації датчика, але окрім них є й інші параметри, що значно здатні впливати на точність датчику.

# 1. РОЗГЛЯД СУЧАСНИХ МЕМС ГІРОСКОПІВ ДЛЯ НАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ.

## 1.1. Принцип дії та класифікація МЕМС гіроскопів

Зазвичай робота мікро електромеханічних гіроскопів заснована на здатності чутливого елемента сприймати обертання. Вібраційні гіроскопи засновані на передачі енергії між коливаннями двох типів, що зумовлене прискоренням Коріоліса. Суть такого прискорення полягає в тому, що за рахунок обертального руху об'єкта точки які розташовані на певній відстані від полюсів мають різну швидкість і для того щоб перемістити матеріальну точку без зміни траєкторії їй необхідно надати певне прискорення.

У залежності від властивостей гіроскопи можна поділити на три категорії: інерційні, тактичні та швидкісні. Найбільшого розвитку зазнали гіроскопи швидкісного типу, за рахунок впровадження їх у автомобільну промисловість.

Порівняльна характеристика даних гіроскопів наведена у таб. 1.1.1

Розглянемо найпоширеніші види конструкцій МЕМС гіроскопів.

Камертоні гіроскопи складаються з двох мас, на які діє коливання проти фази за рахунок збудження електростатичним двигуном гребінчастого типу, кожна з мас збуджується парою гребнів, внутрішніх і зовнішніх. Під час подачі напруги спочатку на зовнішні, а потім на внутрішні гребні ємнісні пластини вимірюють коливання, які були викликані силою Коріоліса у вигляді напруги. Оскільки сила Коріоліса пропорційна до кутової швидкості, то і вимірювана напруга є також пропорційною до неї.

Арк.	Арк.	№ докум.	Підпис	НАУ 21 09 11 000 ПЗ				
Виконав	Бентковський Г.О.			НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ ІНЕРЦІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЧ	Літ.	Арк.	Аркуші	
Керівник	Сущенко О.А.							
Консульт.	Сущенко О.А.				ФАЕТ-СУ -401			
Контрол.	Дивнич М.П.				151			
Зав.каф.	Тичиніна О.М.							



Вібраційні гіроскопи дискового типу складаються з диску, на який діє вібрація відносно його осі симетрії, приклад такого гіроскопа показаний на рис. 1.1.2. Під час обертання диск нахиляється на певний кут, зміну цього кута зчитують ємнісні електроди, які знаходяться під диском. Один вібраційний диск здатен отримувати положення по двох осях. Прикладом такого гіроскопа є полі-кременевий поверхневий мікро-машинний гіроскоп розроблений компанією U.S. Berkeley Sensors and Actuators Center, він представлений на рис. 1.1.3

Таблиця 1.1.1

Параметр	Швидкісні гіроскопи	Тактичні гіроскопи	Інерційні гіроскопи
Випадкова похибка по куту, $\sigma/\sqrt{h}$	>0,5	0,5-0,05	<0,001
Дрейф відхилення, $\sigma/h$	10-1000	0,1-10	<0,01
Точність масштабного коефіцієнта, %	0,1-1	0,01-0,1	<0,001
Повний діапазон, о/с	50-1000	>500	>400
Максимальний удар, g	$10^3$	$10^3-10^4$	$10^3$
Полоса пропускання	>70	100	100

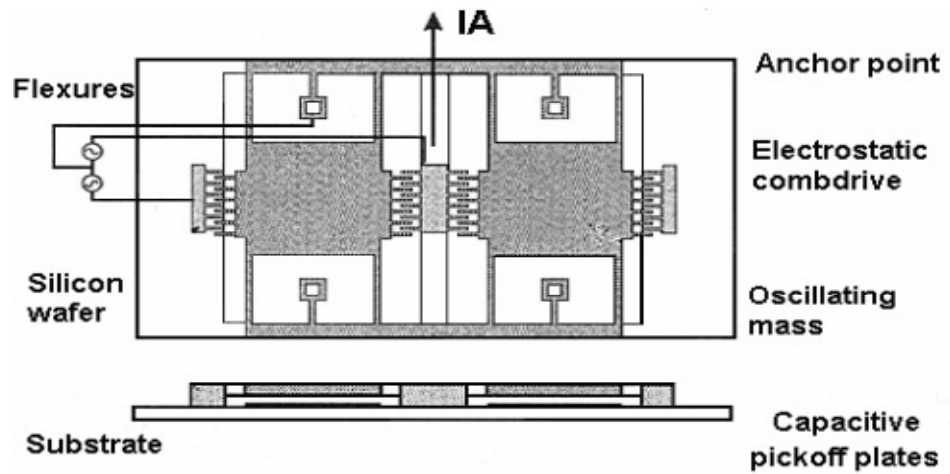


Рис. 1.1.1. Конструкція МЕМС гіроскопа камертонного типу.

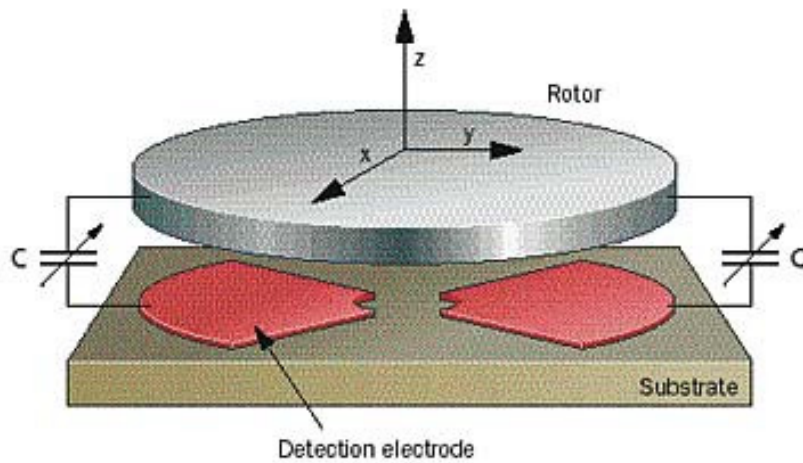


Рис. 1.1.2. Принцип конструкції вібраційного диска компанії Robert Bosch.

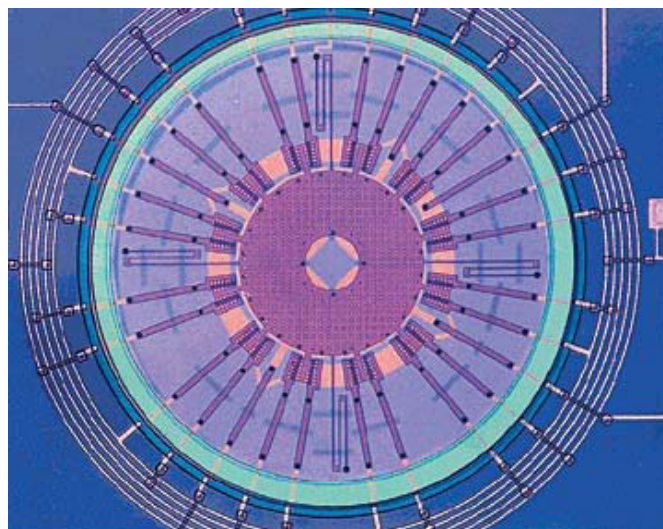


Рис. 1.1.3 Полі-кремений поверхневий мікромашинний вібраційний дисковий гіроскоп розроблений в U.S. Berkeley Sensors and Actuators Center

Напівсферичний резонансний гіроскоп є також представником різновиду МЕМС гіроскопів, резонатор таких гіроскопів виконаний зі кварцового скла. Принцип його роботи полягає в наступному резонансне кільце уводиться в резонанс і положення кута обертання визначається положенням кутових точок. Зображення даного гіроскопа приведенне на рис. 1.1.4.

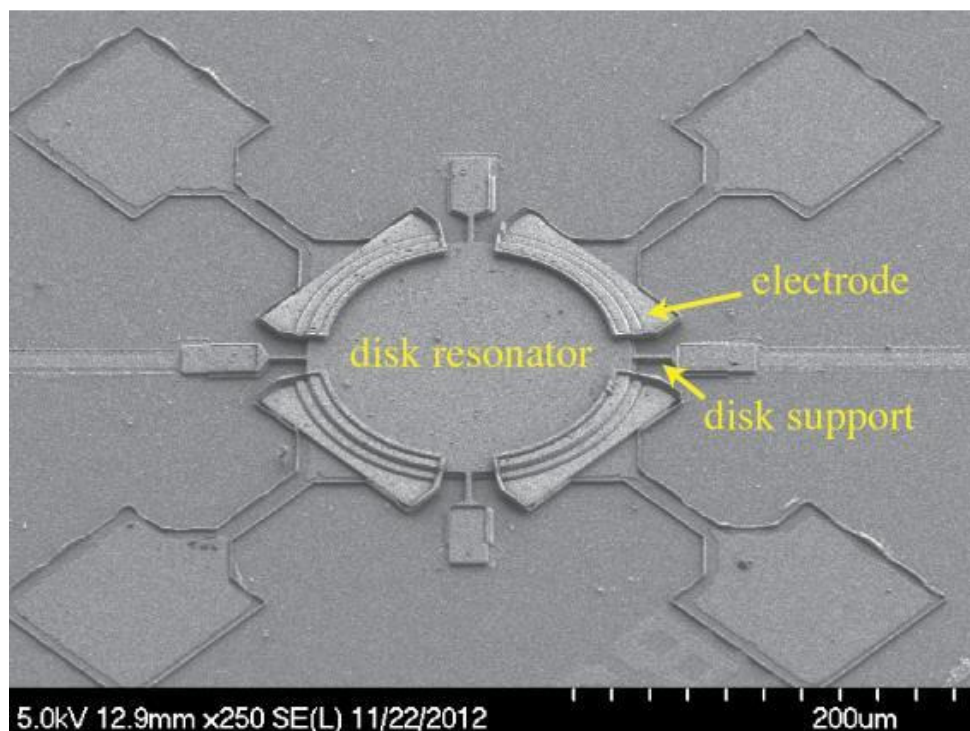


Рис. 1.1.4 Напівсферичний резонансний гіроскоп

Ще одним типом мікомеханічних гіроскопів є п'єзоелектричний гіроскоп. Чутливий елемент датчика складається з п'єзоелектричних пластин, під час обертання перпендикулярно до поданої напруги, напруга яка утворюється у третьому ортогональному перпендикулярному напрямку, пропорційна до кутової швидкості. Зображення даного гіроскопа приведенне на рис 1.1.5.

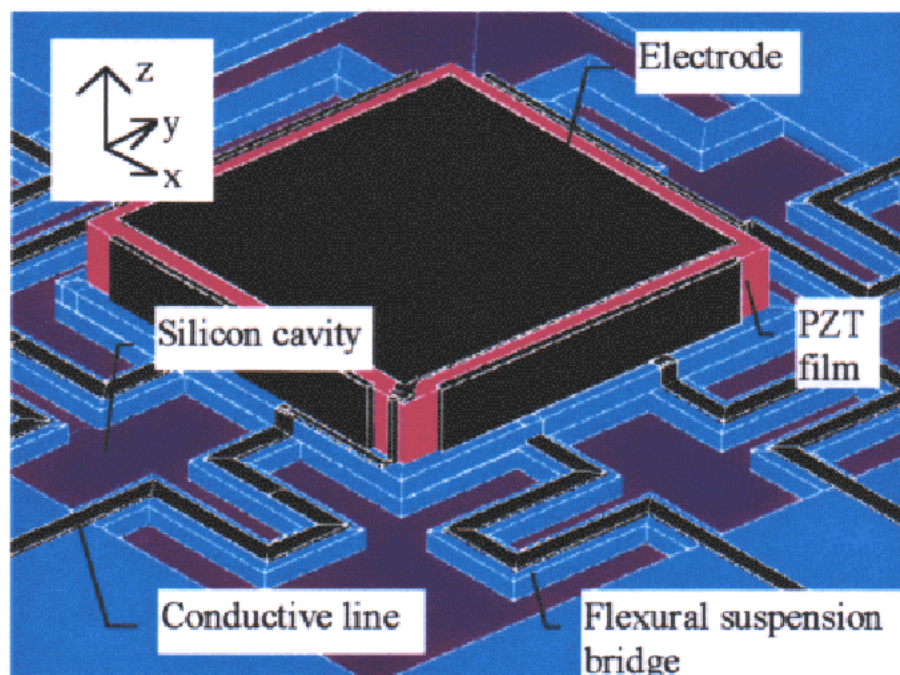


Рис 1.1.5. П'єзоелектричний двох осьовий гіроскоп

За особливостями конструкції вібраційні гіроскопи можна поділити на:

- 1) датчики обертання по осям X та Y (осі в горизонтальній площині), та по осі Z (осі у вертикальній площині).
- 2) для вимірювань обертальної і лінійної вібрацій
- 3) зі використанням лінійної маси та вібраційного кільця і маси.
- 4) зі використанням дво масового або одно масового камертону.

За механізмом дії MEMS гіроскопи можна поділити на електричні, п'єзоелектричні й електростатичні.

За технологією виготовлення таких датчиків поділяються на: монолітно-кремеві, полі-кремеві та змішані.

## 1.2. Технологічні особливості та приклади сучасних MEMS гіроскопів

Провідними в області розробки та вироблення сучасних мікро механічних гіроскопів являються наступні компанії: Analog Devices, BEI Systron Donner, Bosch, Melexis, Silicon Sensing Systems, Infineon.

**Analog Devices** – лідер у розробці MEMS гіроскопів, основними представниками якої є камертонні гіроскопи різних типів.

Датчики цієї компанії представлені на ринку технологіями iMEMS® и iSensor™ Gyros, вони складають основну частину MEMS гіроскопів для вимірювання кутової швидкості.

Технологія iMEMS сконцентрована на розміщенні мікромеханічної структури датчика та схеми обробки на одному кристалі. Гіроскопи з використанням цієї технології представлені сімейством ADXRS, зображення представника наведено у рис 1.2.1

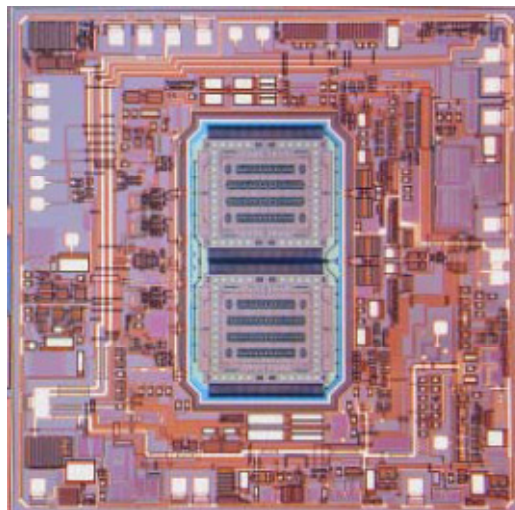


Рис. 1.2.1 Гіроскопічний вимірювач швидкості типу AXDRS  
виготовлений компанією Analog Devices

Особливістю технології iSensor Gyros є закладений в неї вбудований контроль та обробка сигналів. Вона реалізована у лінійці датчиків ADIS Gyros.

Обидві технології виконуються на одному кристалі, на якому розташовуються інтегральна схема для специфічного застосування і механічна частина. Завдяки тому що маса з'єднана зі полікрменевою рамкою, резонанс відбувається в одному напрямку. Ємнісні сенсори вимірюють зміщення резонуючої маси та рамки, що відбувається завдяки силі Коріоліса.

Усі гіроскопи з сімейства ADXRS – призначені для вимірювання кутової швидкості. Вони використовуються для систем безпеки, навігації, стабілізації, а також для інерційних вимірювань. Дані гіроскопи характеризуються можливістю визначення ємнісних вимірювань  $12 \cdot 10^{-21} \Phi$  при відхиленні в  $16 \cdot 10^{-4} E$ . Також для даного сімейства характерна підвищена стійкість до вібрацій та перенавантажень до 1 g. Для вимірювань кутової швидкості, використовуються два незалежних резонатора, завдяки яким можливо не враховувати зовнішні прискорення. Результатом вимірювань є два сингала різної полярності, різниця яких пропорційна до кутовій швидкості.

Гіроскопи лінійки AIDS iSensor призначені для покращення характеристик серії ADXRS шляхом додавання функціоналу для обробки сигналів, таких як програмування, управління живленням, додавання цифрового виводу або вводу, додавання додаткових ASIC інтерфейсів та ін. Дані датчики мають широкий спектр застосувань їх використовують в системах навігації, безпеки, безпілотних системах, у системах авто пілотування, системах зв'язку тощо.

Одним із представників цієї лінійки є ADIS16060, схема якого зображена на рис. 1.2.2. У якому механічний сигнал після демодуляції подається на SPI інтерфейс який надає цифрові дані, що пропорційні до кутової швидкості. Єдина конструкція датчика та засобу обробки сигналу дозволяє підвищити стійкість датчика до зовнішніх шумів. Також завдяки SPI – інтерфейсу надаються дані щодо вимірювань зовнішньої температури.

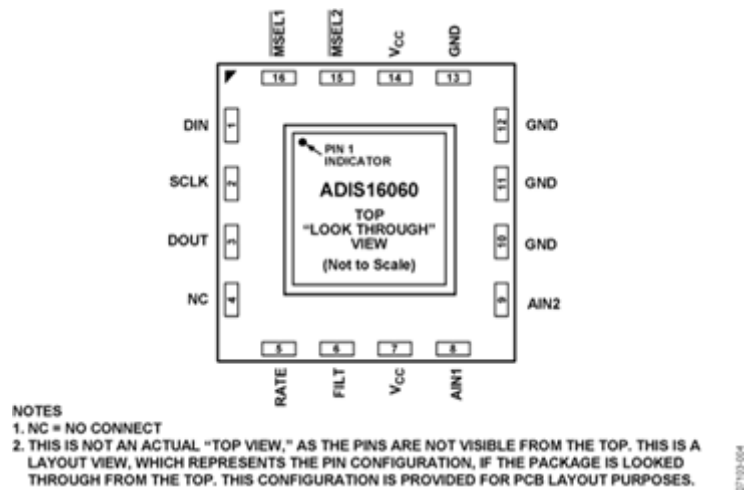


Рис 1.2.2 Схема гіроскопа ADIS16060 з SPI інтерфейсом.

Гіроскопи компанії **Robert Bosch** займають значну частину ринку, вони займають лікуючу позицію у виробленні кременевих вібраційних гіроскопів. У розробці ведуться датчики кутової швидкості як для вертикальної площини так і для горизонтальної. Конструкція датчика горизонтальної площини складається з електромагнітного управляючого приводу з ємнісним чутливим елементом, вона представлена на рис. 1.2.3. Конструкція датчика горизонтальної площини використовує обертальну вібраційну масу, і наведена на рис 1.1.2. Цифрові пристрої та датчики компонуються на герметичній металічній основі (рис. 1.2.4, 1.2.5) і розміщуються в пластиковому корпусі (рис. 1.2.6)

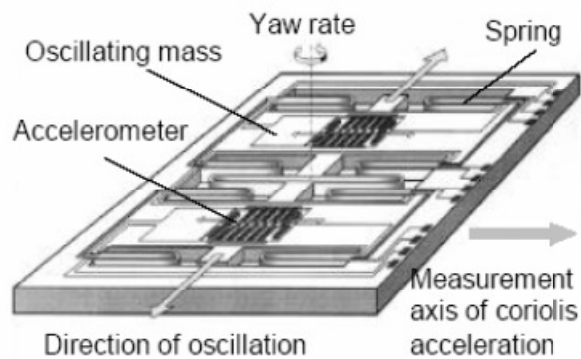


Рис. 1.2.3 Датчик камертонного типу з подвійною кременевою масою

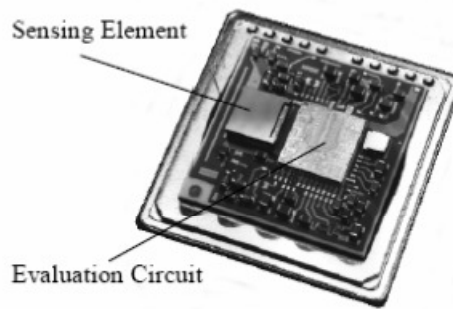


Рис. 1.2.4 Чутливий елемент та цифрові пристрої скомпоновані на металічній основі.

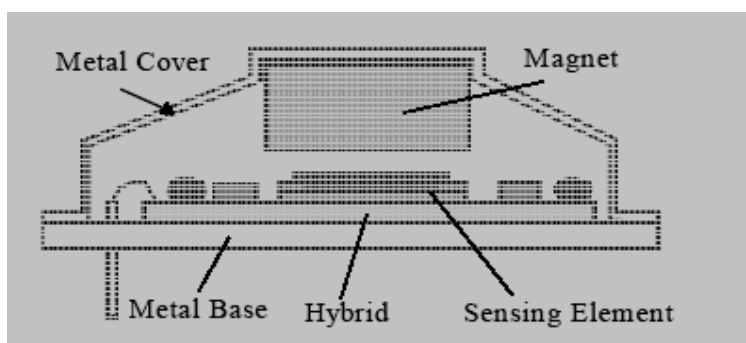


Рис. 1.2.5 Переріз конструкції, на якому зображений постійний магніт який підвішений над кристалом датчика

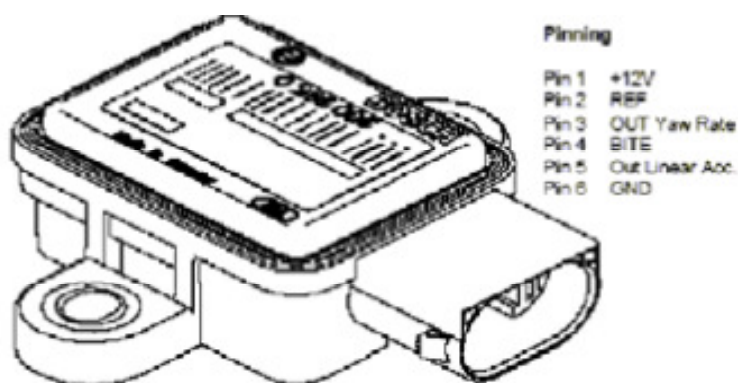


Рис. 1.2.6 Пластиковий корпус з компонований із інтегральними з'єднувачами та монтажними кронштейнами.

**BEI Systron Donner** основний розробник та постачальник гіроскопів для автомобільного транспорту. Датчики виробляють на основі цільно кварцового інерційного датчика (рис. 1.2.7). Дані MEMS гіроскопи призначені засновані на вібраційних камертонах та п'єзоелектричних



принципах обробки даних. Завдяки використанні п'єзоелектричного кварцового матеріалу відбувається спрощення сенсорного елемента, який здатний працювати у режимах, які не викликають зношення, у зв'язку чим забезпечується підвищена надійність, стабільність та довговічність.

Ілюстрації чутливого елемента(рис.1.2.7), готового корпусного(рис. 1.2.9) та модульного(рис. 1.2.10) виконання наведені нижче.



Рис. 1.2.7. Кварцовий чутливий елемент виробництва Systron Donner.

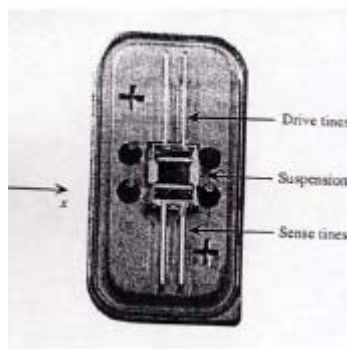


Рис. 1.2.8 Корпусне виконання.



Рис. 1.2.9 Модульне виконання.

Infineon Technologies SensoNor AS виробляє гіроскоп вібраційного типу SAR 10 у якому реалізований цифровий інтерфейс SPI для виявлення крену (рис. 1.2.10). Датчик складається з міромеханічної частини та інтегральної схеми спеціального призначення, що розміщуються в SOIC(Small-Outline Integrated Circuit). SAR10 структурно виконаний у формі метелика з двома масами на яких розташований односторонній електричний збуджувач і схема емнісного спостереження.

Принцип роботи даного датчика реалізуються наступним чином: маса чутливого елемента збуджується і виконує вібрацію вздовж своєї осі. Вхідне обертання утворює вібрацію, що зчитується навколо осі, що проходить по нормалі до осі збудження та вхідної осі.

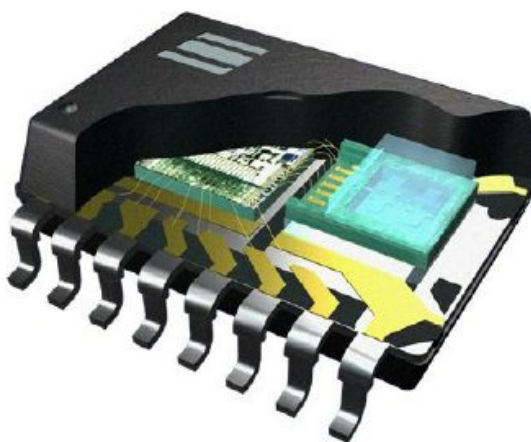


Рис. 1.2.10 Гіроскоп SAR10 з SPI інтерфейсом, виготовлений Infineon Technologies SensoNor AS.

Гіроскопы **Silicon Sensing Systems** використовують технологію Silicon Vibrating Structure Gyroscope (SiVSG) – для створення вібрації кільця, режим якого змінюється у зв'язку з впливом сили Коріоліса(рис. 1.2.11). Для створення електромагнітного резонансу кільцевий резонатор доповнюється

центральним магнітом. Струм передається на опори кільця, що створює резонанс. Рух кільця визначається по напрузі, що подається на опори.

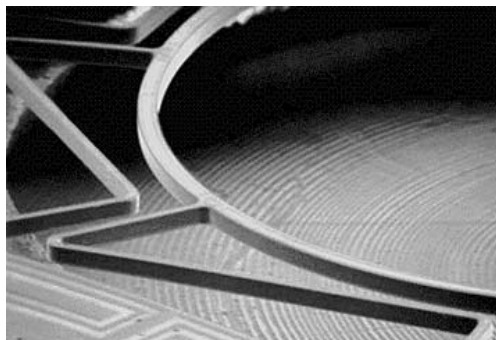


Рис. 1.2.11. Резонуюче кільце том, гіроскопа виробництва Silicon Sensing Systems



Рис. 1.2.12 Конструкція гіроскопа з постійним магнітом, який встановлено у верхній частині датчика.

Гіроскоп MLX90609 компанії **Melexis**.

Даний датчик складається з кременевої мікромеханічної частини та схеми для обробки сигналів. В основі виробництва полягає процес, який називається SOI(Silicon on Insulator). Кожна частина структури гіроскопа складається з двох рамкового гіроскопу на кременевій основі. Особливістю даного гіроскопа є можливість формувати два типи сигналу: цифрового та аналогового, пропорційних до кутової швидкості. Гіроскопічний вимірювач має наступні області використання: навігація, стабілізація та робототехніка.

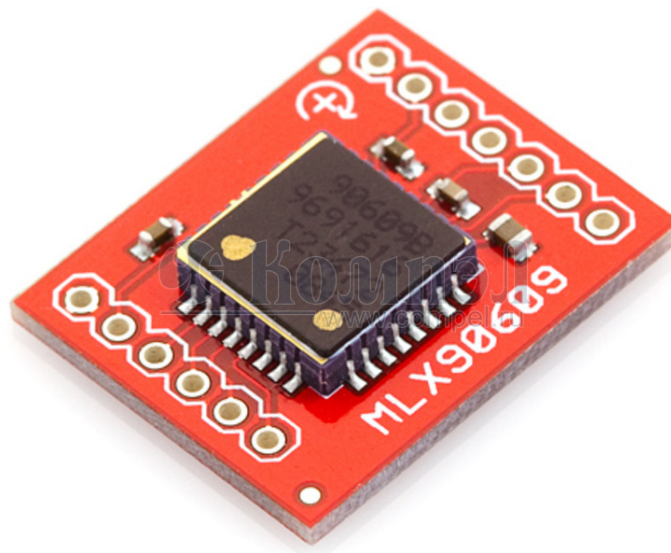


Рис. 1.2.13 Гіроскоп MLX90609 виробництва компанії Melexis.

### **1.3.Висновки щодо структури та характеристик сучасних MEMS гіроскопів**

Гіроскопи займають значну частину ринку MEMS індустрії інтегральних датчиків. Сфери їх використання не закінчуються навігацією і широко використовуються у медичних, промислових системах, системах безпеки, зв'язку та стабілізації.

MEMS гіроскоп складається з резонатора який встановлюється на осі чутливості і мікро датчика, що встановлюється на осі вимірювань. Характеристики гіроскопа у більшості залежать від можливих відхилень у процесі виготовлення та проектування компоновки, лінійне прискорення та температура.

Мікро механічні датчики розглянуті у попередньому підрозділі складають основу для розробки нових модифікацій MEMS гіроскопів. Найактуальнішими для сьогодення є ємнісні вібраційні гіроскопи робота яких заснована на ефекті Коріоліса.

## 2. ОСОБЛИВОСТІ КОНФІГУРАЦІЙ НАДМІРНИХ НЕОРТОГОНАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ МЕМС ГІРОСКОПІВ.

### 2.1. Комплексний аналіз надмірних векторних вимірювачів

Для того щоб виконати вимірювання вектору необхідно реалізувати вимірювальний базис. Сукупність таких векторів формує векторний простір.

Вимірювач, вимірювальні і управляючі розмірності базисів якого рівні ( $n = n_0$ ), називається ненадмірним векторним вимірювачем, він призначений для вимірювання ненадмірного векторного простору [1]. При умові  $n < n_0$ , отриманої інформації недостатньо для управління, при  $n > n_0$  інформація буде надмірною.

Надмірним векторним вимірювачем – називається вимірювач, який складається з одноступеневих вимірювачів, кількість яких має перевищувати мінімальну для вимірювання вектору.

Показник надмірності розраховується за формулою:

$$m = n - n_0 \quad (2.1.1),$$

де  $n$  – загальне кількість вимірювачів;  $n_0$  – мінімальна кількість вимірювачів, що необхідна для вимірювання вектору.

Положення осі чутливості одноступеневого вимірювача характеризується одиничним вектором, сукупність цих векторів утворює лінійний векторний простір. Тобто, простір утворений надмірним вимірювачем, це надмірний векторний простір відносно ненадмірного векторного простору, що утворюється ненадмірним вимірювачем[2].

				<b>НАУ 21 09 11 000 ПЗ</b>			
Арк.	Арк.	№ докум.	Підпис				
Виконав	Бентковський Г.О.			<b>НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ ІНЕРЦІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЧ</b>	Літ.	Арк.	Аркуців
Керівник	Сущенко О.А.					9	21 98
Консульт.	Сущенко О.А.				<b>ФАЕТ-СУ -401</b>		
Контрол.	Дивич М.П.						
Зав.каф.	ТичинінаЗ				<b>151</b>		

За рахунок використання надмірності в системах управління, поліпшується точність, надійність та готовність. Найкращого результату можна досягти при використанні лінійної незалежності одиничних векторів, що зв'язані з орієнтацією осей чутливості вимірювачі. У такому разі при виходу з ладу одного з ненадмірних векторних вимірювачів, його можна замінити справним.

Чутливими елементами векторного надмірного вимірювача можуть бути акселерометри, динамічні гіроскопи, датчики кутових швидкостей або інші пристрої, які визначають параметри руху.

## 2.2.Орієнтація у надмірному вимірювальному просторі

Під час аналізу методів орієнтації надмірних вимірювачів основним завдання є вибір сукупності параметрів, які будуть визначати положення відносно керуючого базису, та отримання рівнянь перетворення координат вектору, з ненадмірного вимірювального базису в загальний

Для проектування надмірних вимірювальних пристроїв загалом використовують чотири методи орієнтації у яких конус використовується як фігура симетрії[1]:

1) Вимірювачі обраховують своє положення по твірним конуса, вісь симетрії визначається вздовж вимірюваного вектору, або у напрямку, що оптимальний до змінного напрямку вимірюваного вектору. Осі чутливості вимірювальних елементів розташовуються на твірних конуса з інтервалом у кут  $\theta = \frac{2\pi}{n}$ (рис. 2.2.1).

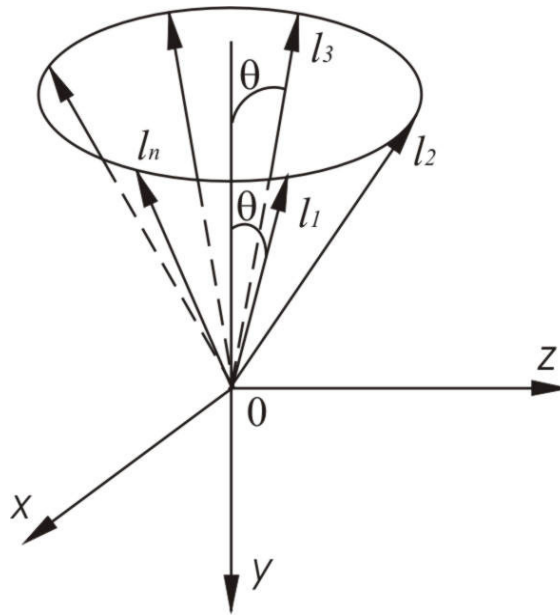


Рис. 2.2.1 Орієнтація надмірних вимірювальних пристроїв по твірним конуса з інтервалом у кут  $\theta = \frac{2\pi}{n}$ .

2) При розташуванні вимірювача на осі симетрії конуса вимірювачі позиціонуються з інтервалом у кут  $\theta = \frac{2\pi}{n-1}$  (рис. 2.2.2).

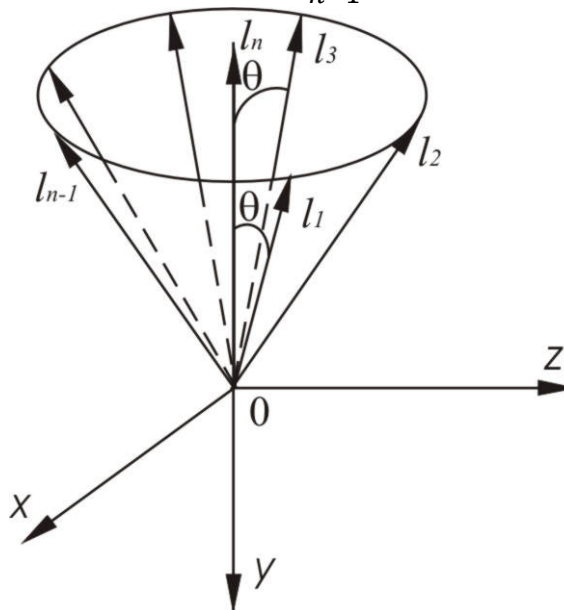


Рис. 2.2.2 Орієнтація надмірних вимірювальних пристроїв по твірним конуса з інтервалом у кут  $\theta = \frac{2\pi}{n-1}$ .

- 3) Розташування конусів на одній осі симетрії.
- 4) Розташування конусів на різних осях симетрії.

На рис 2.2.1 та 2.2.2  $l_i$  – це позначення осей чутливості вимірювальних елементів.

Розташування осі чутливості вимірювачів до граней правильного многогранника, також є одним із варіантів для визначення орієнтації. При чому в правильних багатогранників окремі грані можуть паралельними одна до одної, в такому випадку кількість вимірювальних пристроїв не рівне числу граней. Дані щодо граничної кількості надмірних вимірювачів для кожного з правильних багатокутників наведено у таблиці 2.2.1

Таблиця 2.2.1

Назва багатокутника	Кількість вершин	Кількість ребер	Кількість граней	Максимальне число А
Куб	8	12	6	3
Тетраедр	4	6	4	4
Октаедр	6	12	8	4
Додекаедр	20	30	12	6
Ікосаедр	12	30	20	10

У випадку розташування максимальної кількості перпендикулярно до =граней додекаедра, щоб отримати симетричне положення осей чутливості відносно осі керуючого базису, необхідно обрати орієнтацію багатокутника відносно нього(рис. 2.2.3).



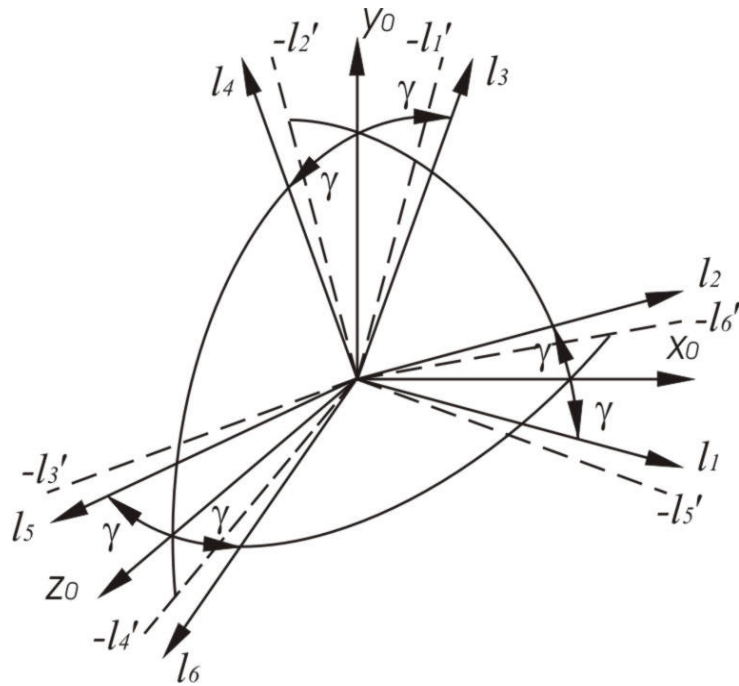


Рис. 2.2.3. Симетричне розташування осей чутливості надмірних вимірювальних пристроїв.

На схемі, що зображена вище, осі чутливості датчиків розташовані відносно осей керуючого базису на кут  $\gamma$ . Для отримання даних про положення вектору, необхідно два та більше вимірювальних елементів, що розташовані в одній площині.

Далі будуть розглядатися наступні схеми побудови надмірного векторного вимірювача:

- 1) Чотири чутливі елементи розташовані за твірними конуса;
- 2) Чотири чутливі елементи розташовані за твірними конуса, один чутливий елемент за віссю його симетрії;
- 3) П'ять чутливих елементів розташовані за твірними конуса, один чутливий елемент на вісі його симетрії;
- 4) Три чутливі елементи розташовані за твірними конуса, один чутливий елемент на вісі його симетрії

Для пояснення принципу дії наступних схем вводяться наступні означення.

$I$  – вектор вимірювальної системи координат, розмірність якого еквівалента кількості чутливих елементів.

$\omega$  – вектор базової, системи координат.

$$\omega = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T; (2.1)$$

$H$  – матриця перетворень із базової системи координат у вимірювальну.

$$l = H * \omega; (2.2)$$

звідки

$$\omega = [H^{-1} * l]; (2.3);$$

де

$$l = [l_1, l_2 \dots l_n]^T (2.4);$$

$n$  – кількість чутливих елементів у вимірювачі. Розмірність матриці  $H$  –  $n \times 3$ .

Положення надмірного векторного вимірювача, що складається з чотирьох датчиків, які розташовується за твірними конуса та одного елементу, який розміщується поза віссю симетрії, представлено на рис. 2.2.4, на якому  $O_{xyz}$  – базова система координат;  $O_{l_1 l_2 l_3 l_4 l_5}$  – вимірювальна система координат.

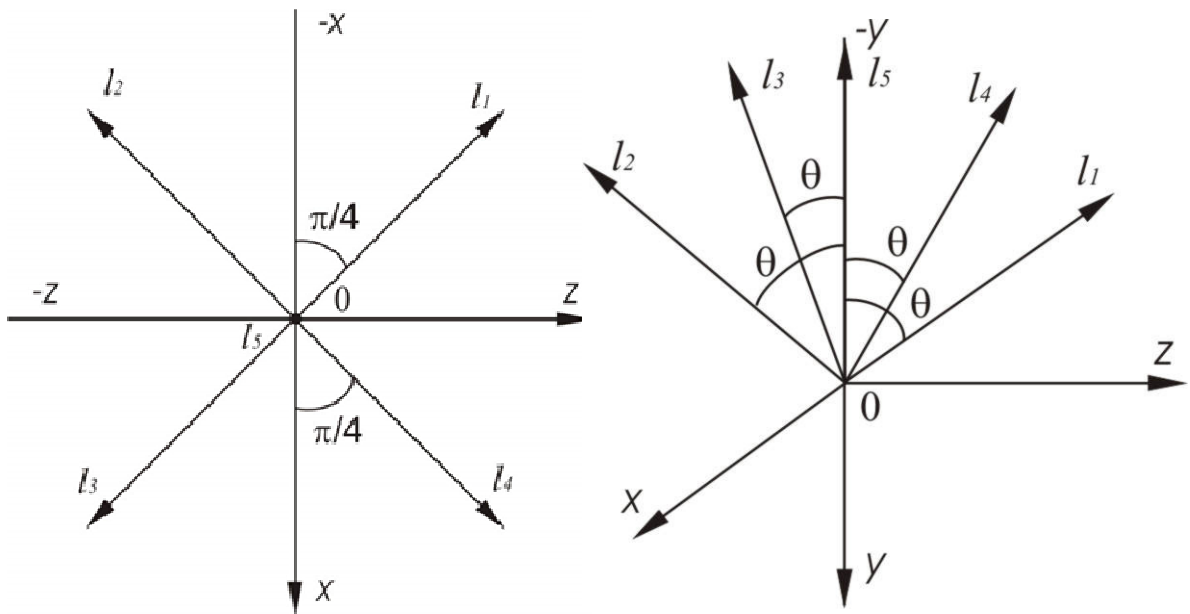


Рис.2.2.4 Положення чотирьох чутливих елементів за твірними та одного за віссю симетрії

Виходячи з положення векторів, що зображені на рис. 2.2.4 матриця направляючих косинусів( $H$ ) матиме вигляд:

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Положення надмірного векторного вимірювача, що складається з чотирьох датчиків, які розташовується з твірними конуса зображено на рис 2.2.5, на якому \_\_\_\_\_ – базова система координат; \_\_\_\_\_ – вимірювальна система координат.

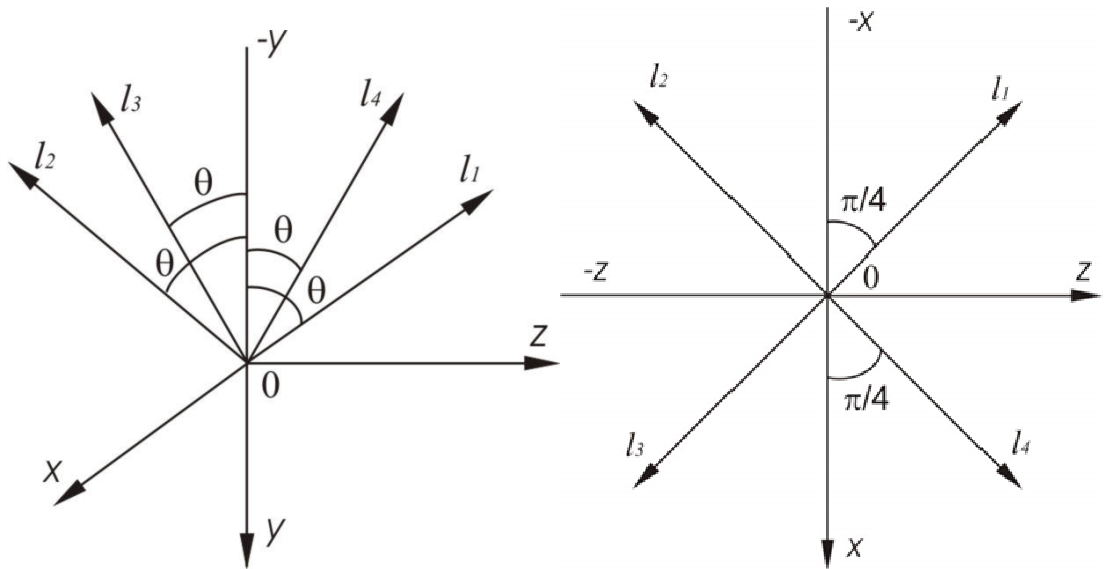


Рис 2.2.5 Положення чотирьох чутливих елементів, що розташовані за твірними конуса.

Враховуючи рис. 2.2.5 матриця направляючих косинусів має наступний вигляд:

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Положення надмірного векторного вимірювача, що складається з п'яти датчиків, які розташовується за твірними конуса та одного елементу, який розміщується поза віссю симетрії, представлено на рис. 2.2.6, на якому – базова система координат; – вимірювальна система координат.

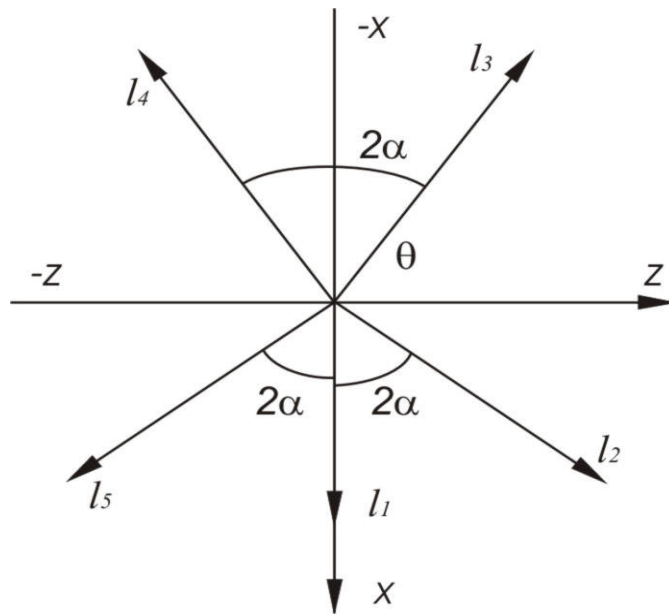


Рис. 2.2.6 Положення п'яти чутливих елементів за твірними та одного за віссю симетрії

Згідно положень векторів на рис 2.2.6 матриця направляючих косинусів має такий вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ \cos 2\alpha \sin \theta & -\cos \theta & \sin 2\alpha \sin \theta \\ -\cos \alpha \sin \theta & -\cos \theta & \sin \alpha \sin \theta \\ -\cos \alpha \sin \theta & -\cos \theta & -\sin \alpha \sin \theta \\ \cos 2\alpha \sin \theta & -\cos \theta & -\sin 2\alpha \sin \theta \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9).$$

Положення надмірного векторного вимірювача, що складається з п'яти трьох датчиків, які розташовується за твірними конуса та одного елементу, який розміщується поза віссю симетрії, представлено на рис. 2.2.6, на якому  $O_{xyz}$  – базова система координат;  $O_{l_1 l_2 l_3 l_4 l_5}$  – вимірювальна система координат.

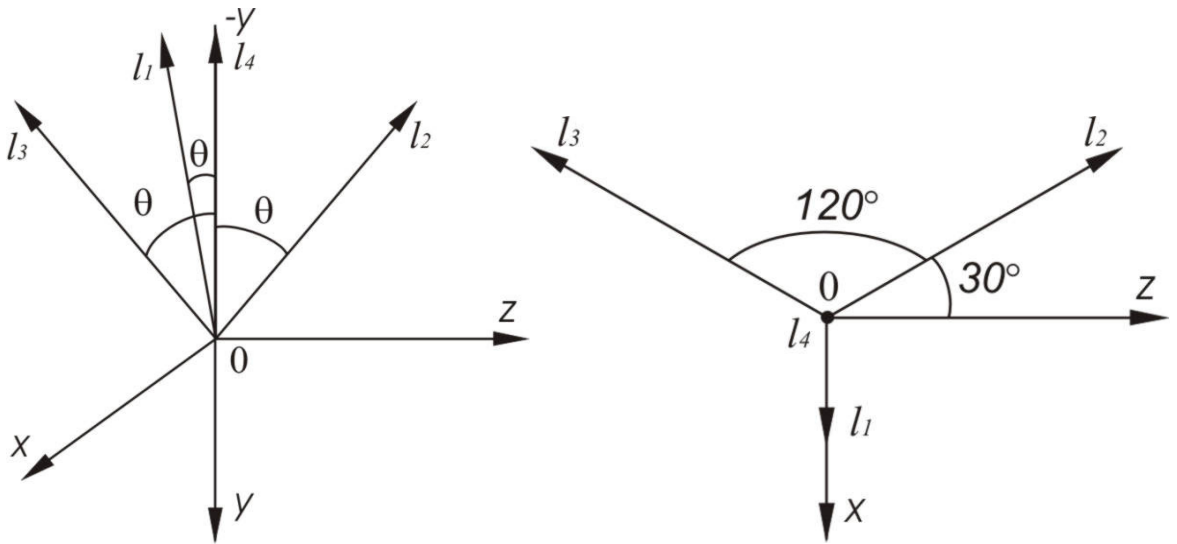


Рис. 2.2.7 Положення трьох чутливих елементів за твірними та одного за віссю симетрії

Виходячи з рис 2.2.7 матриця направляючих косинусів виглядає наступним чином:

$$H = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ -\frac{\cos \pi}{3 \sin \theta} & -\cos \theta & -\frac{\cos \pi}{6 \sin \theta} \\ -\frac{\cos \pi}{4 \sin \theta} & -\cos \theta & -\frac{\cos \pi}{6 \sin \theta} \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

### 2.3. Висновок

Властивості руху в системах управління визначаються за допомогою акселерометрів або приладів для визначення кутової швидкості. До головних параметрів таких вимірювачів відносять показник надмірності вимірювального приладу, який призначений для оцінки ефективності застосування надмірності. Використання надмірності дає можливість знизити похибку вимірювання, а також підвищити надійність, оскільки при виході з ладу одного з датчиків, вимірювальний пристрій продовжить свою роботу зі збільшеною похибкою замість повної відмови.

Щоб побудувати векторний простір існує чотири варіанта позиціювання чутливих елементів, фігурою симетрії для яких використовуються конус, їх орієнтація відбувається по твірним конусу. Чутливі елементи розташовуються на твірних конуса з інтервалом рівним значенню певного кута, а також можуть розташовуватись на та поза віссю симетрії.

Одним із варіантів побудови надмірного векторного вимірювача є його побудова з використанням у якості фігури симетрії - конуса. Для створення такого векторного простору існує чотири варіанта розташування датчиків, орієнтація яких відбувається по твірним конусу. Чутливі елементи розташовуються на твірних конуса з інтервалом рівним значенню певного кута, а також можуть розташовуватись на та поза віссю симетрії.

### 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЧІВ.

#### 3.1.Динамічне дослідження точності інерційних вимірювальних пристроїв

Динамічний аналіз проводить оцінку точності інерційного вимірювача з точки зору просторових кутових рухів за допомогою трьох ступеневого випробувального стенду, який показаний на фіг. 3.1.1



Трьох ступеневий динамічний стенд 3.1.1

Робота такого стенду заснована на роботі інерційного вимірювача, який встановлюється на платформі випробувального стенду, моделюючи поведінку датчика на рухомому об'єкті. Даний процес виконується за допомогою програмного забезпечення, що імітує рух відносно осі системи координат, що пов'язана зі стендом, які у свою чергу відповідні осям навігаційної системи координат.

				<b>НАУ 21 09 11 000 ПЗ</b>			
Арк.	Арк.	№ докум.	Підпис	<b>НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ ІНЕРЦІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЧ</b>	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав	Бентковський Г.О.					9	98
Керівник	Сущенко О.А.				<b>ФАЕТ-СУ -401</b>		
Консульт.	Сущенко О.А.				<b>151</b>		
Контрол.	Дивнич М.П.						
Зав.каф.	Тичиніна О.М.						



Стенд включає в себе блок живлення, ЕОМ, блок керування, три крокові двигуна, вимірювач кута та платформу, що встановлена на кардановому підвісі. Схема експериментального стенду наведена на рис 3.2.2, а. Зчитування показів приладу спостереження руху MPU-6050 виконується за допомогою мікроконтролеру АТМЕГА168. Схема з'єднання взаємодії приладу спостереження руху та мікроконтролера зображена на рис 3.2.2 б.

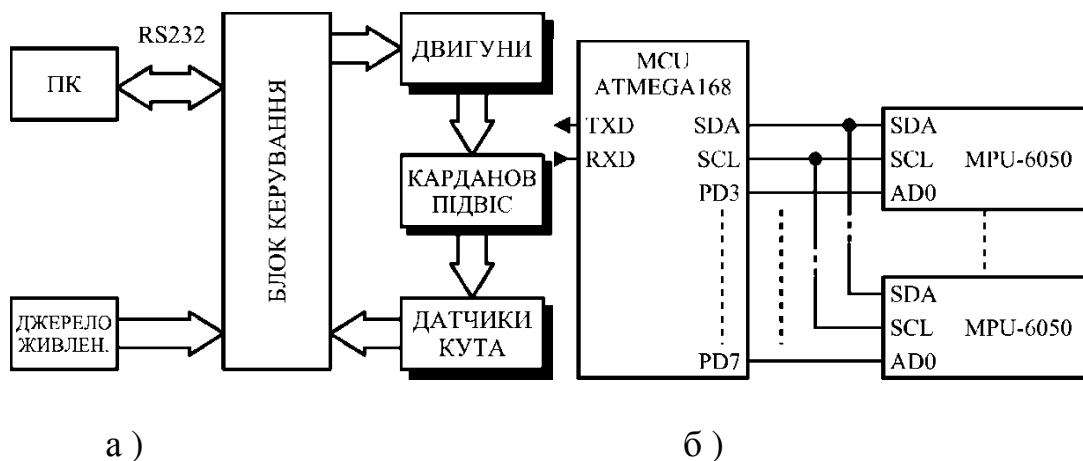


Рис. 3.2.2 Прилади для динамічного аналізу (ЕОМ): а – структурна схема експериментального стенду; б – схема з'єднання взаємодії приладу спостереження руху та мікроконтролера.

Зчитування та обробка навігаційних даних виконується професійним програмним забезпеченням. Що виконує синхронно виявляє дані про кутову швидкість, що надходить від самостійних MEMS – гіроскопів. Програмна частина включає в себе термінал управління, та драйвера мікроконтролера АТМЕГА168. Операцію вводу та виводу відбувається за допомогою інтерфейсу UART.

Оскільки апаратні можливості контролера АТМЕГА168 обмежені тільки цілочисельними операціями, для забезпечення необхідної точності та швидкодії ефективніше виконувати розрахунки програмним комплексом.

Реалістичність експериментальної моделі підвищуються за рахунок включення випадкових похибок, які виникають за рахунок зовнішніх збурень. Стенд надає можливість для імітації як стохастичного так і дотермінового кутового руху. Зміна властивостей моделювання відбувається автоматично, за рахунок реалізованого програмного забезпечення.

Неортогональний навігаційний вимірювач розміщений на платформі триступеневого стенду, що встановлений на шарнірі підвіски. Таке розташування дозволяє моделювати будь-які кутові рухи відносно трьох осей, які відповідають осям навігаційного простору. Моделювання рухів відносно кожної осі навігаційної системи координат, виконується за рахунок тестових сигналів, що являють собою гармонічні сигнали зі різними періодами. Такі сигнали мають наступний вигляд

$$x(t) = 5 \sin\left(\frac{\pi}{6} * t\right); y(t) = 5 \sin\left(\frac{\pi}{12} * t\right); (3.1)$$

Для МЕМС гіроскопів характерні похибки, що виникають за рахунок зміщення нуля, яке у свою чергу відбувається через температурний вплив. Компенсація раніше згаданих похибок відбувається за допомогою наступних засобів:

- 1) Робота інерційного гіроскопу має бути в холосту протягом 15-20 хв. Це необхідно для стабілізації температурного режиму на датчиках та врахування нульового зсуву сигналу.
- 2) Для компенсації систематичної похибки  $\Delta_t$ , переміщення має оцінюватись протягом 1 хв.
- 3) Кутовий рух задається програмними засобами.
- 4) Реалізація експерименту відбувається за рахунок зчитування даних про кутове положення експериментального стенду та інформації вимірної МЕМС датчиками з частотою в 100 Гц.

### 3.2. Теоретичне оцінювання точності

При використанні неортогональних надмірних МЕМС вимірювачів необхідно виконувати перетворення вимірюваних даних. Оскільки інформація з датчика надходить у неортогональній системі координат необхідно виконати її перетворення у ортогональну систему координат, що відбувається за допомогою матриці напрямних косинусів.

Для оцінки складових вектору кутової швидкості необхідно розв'язати систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). У зв'язку з надмірністю інформації отримана СЛАР буде перевизначеною. Для її вирішення можна використати метод найменших квадратів [2, 3]. Критерієм оптимізації може слугувати мінімальний слід матриці. У такому випадку властивості вимірюваного параметру незалежні, а математичне сподівання рівне нулю. При виконанні цих умов кореляційна матриця похибок має наступний вигляд [3]

$$D = [H^t H]^{-1} \quad (3.2)$$

Слід матриці  $D$  – це сума діагональних елементів [3]:

$$tr(D) = \sum_{i=1}^n d_{ii} \quad (3.3)$$

де  $d_{ii}$  – діагональні елементи матриці  $D$ ,  $n$  – кількість датчиків.

Згідно джерела [2, 3], оцінка точності різних конфігурацій надмірних інерційних датчиків виконується на основі виразів (3.2) та (3.3). Наприклад, неортогональний вимірювач складається із шести датчиків розташованих на твірних конуса, тоді кореляційна матриця похибок вимірювання даних представляє собою:

$$tr[H^t H]^{-1} = tr \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} = 1.5.$$

Результати оцінки точності різних конфігурацій надмірних інерційних датчиків виконується на основі виразів (3.2) та (3.3) наведено в таблиці 3.1. У

таблицю занесена інформація про слід кореляційної матриці похибок різних неортогональних датчиків.

Результати оцінки точності різних конфігурацій надмірних інерційних  
одноосьових датчиків

Тип конфігурації	Слід кореляційної матриці похибок		
	Без відмов	При відмові 2 датчиків	При відмові 3 датчиків
5 датчиків повздовж твірних конуса	2,21	3,20	3,92
6 датчиків повздовж твірних конуса	1,79	2,13	4,5
4 датчиків повздовж твірних конуса	1,93	3,15	5,00
5 датчиків повздовж твірних конуса	1,70	2,18	3,35
6 датчиків повздовж твірних конуса	1,50	2,00	3,00

Оцінка точності неортогональних датчиків на основі інерційних вимірювачів наведено у табл. 3.2.

Результати порівняльного аналізу неортогональних конфігурацій на основі інерційний вимірювальних блоків

Тип	Слід кореляційної матриці похибок
Ортогональна	1,00
З використанням трикутної піраміди	0,5
З використанням чотирикутної піраміди	0,

Проаналізувавши таблицю 3.2 можна дійти висновку що неортогональна конфігурація з використанням чотирикутної піраміди, має найвищу точність.

### 3.3. Експериментальне оцінювання точності

Вектор що містить інформацію про положення платформи у просторі

$$\varphi = [\Psi \quad \vartheta \quad \gamma]^T \quad (3.4)$$

де кути  $\Psi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$  відповідають поворотам платформи у фронтальній, горизонтальній та профільній площині. Проекції вектору кутової швидкості на осі навігаційної системи координат знаходяться наступним способом:

$$\Omega = [\omega_x^1 \quad \omega_y^2 \quad \omega_z^3 \quad \dots \quad \omega_x^{n-2} \quad \omega_y^{n-1} \quad \omega_z^n]$$

Де  $n$  – кількість MEMS вимірювачі ( $3 \times 4$  для вимірювача на основі трикутної піраміди,  $3 \times 5$  для чотирикутної). Вектор кутової швидкості для експериментального стенду на проекції навігаційної системи координат, визначається як

$$\omega_\varphi^T = [\omega_\Psi \quad \omega_\vartheta \quad \omega_\gamma] = \Omega^T \quad (3.5)$$

Потім знаходять середнє значення вимірюваної кутової швидкості.

$$\omega_{\varphi av} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_{\varphi} (3.6)$$

де  $m$  – кількість вимірювань.

Точність інерційного вимірювача визначається за допомогою порівняння вимірної кутової швидкості (3.6) і кутової швидкості випробувального стенда (3.4). Для зменшення похибки необхідно врахувати систематичну та температурну похибку.

$$\varphi = \omega_{\varphi av} - \varphi' - \Delta_{i\varphi} (3.7)$$

де  $\varphi$  – вимірювань похибка інерційного вимірювача,  $\varphi'$  – похідна заданого положення кута.

Для відображення похибки використовують середньоквадратичне відхилення(СКВ). Виходячи з умов виразу (3.7) СКВ дорівнює:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\varphi' - \varphi)^2} (3.8)$$

Динамічний аналіз був проведений для експериментального стенду, що має три ступені свободи. Слід відмітити, що під час експерименту розрахункова кутова швидкість була подана лише в одному напрямку.

Спочатку проводилась оцінка точності єдиного пристрою відстеження руху MPU-6050. Результати експерименту представлені на рис. 3.6, де показано проекції вимірної кутової швидкості на осі навігаційної системи відліку. Цей підхід дає змогу забезпечити порівняння похибок окремого інерційного блоку і надмірних вимірювачів з використанням конструктивних характеристик типу трикутної та чотирикутної піраміди.

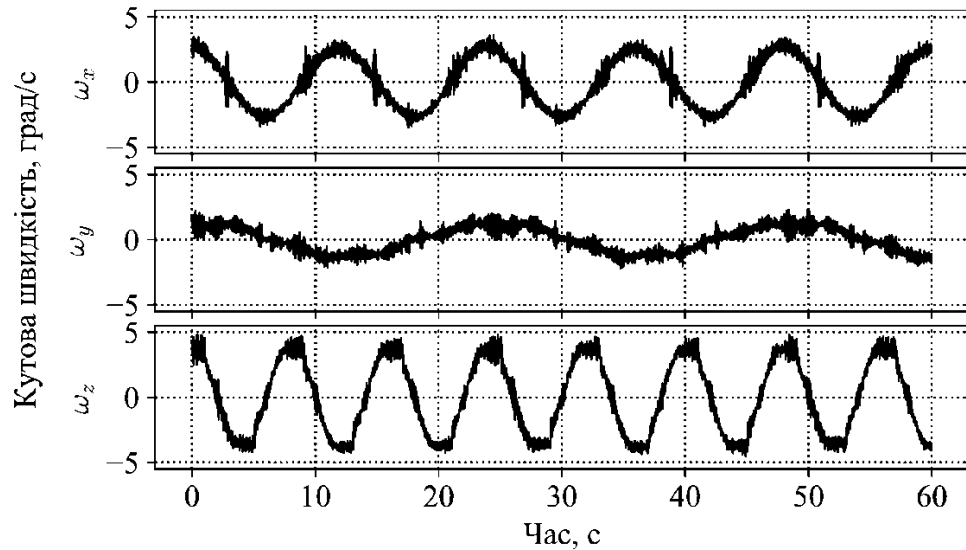


Рис. 3.3.1 Графічні залежності кутових швидкостей

Результати динамічного аналізу неортогональних надлишкових інерційних вимірювачів на основі таких конструктивних елементів, як трикутні та чотирикутні піраміди, представлені на рис. 3.3.1 Ці дані являють собою середні значення показань кутових швидкостей, виміряних відповідно до представленої вище методології. Отримані результати вимірювань перетворено в проєкції кутових швидкостей на осі навігаційної системи відліку, згідно матриць спрямованих косинусів, що були показані у таблицях 3.1, 3.2.



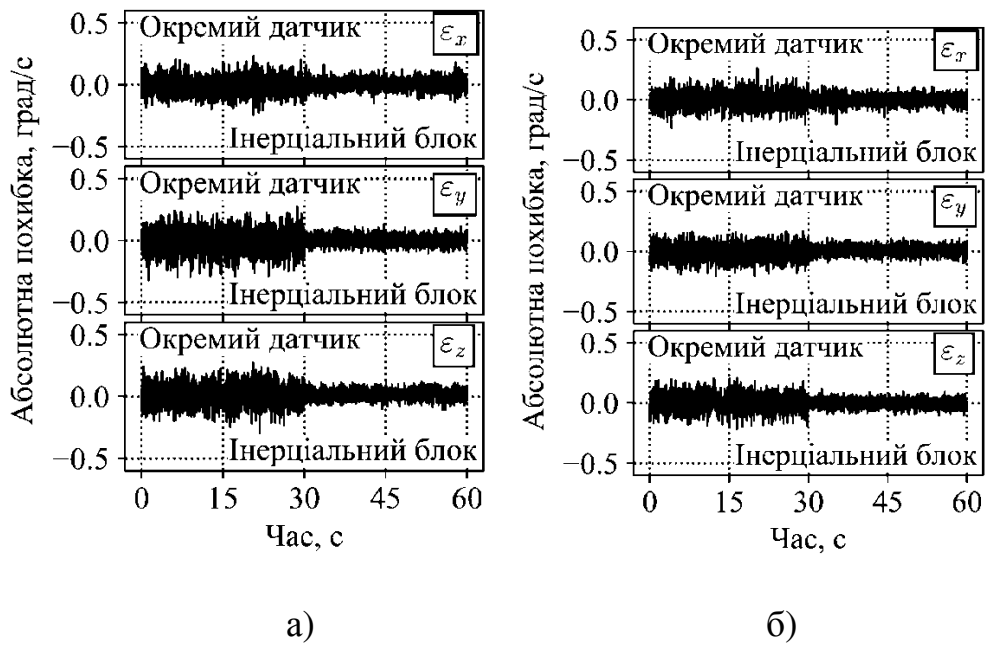


Рис. 3.3.2. Абсолютна похибка визначення кутової швидкості за допомогою неортогонального надлишкового інерційного вимірювального приладу: а) – на основі трикутної піраміди; б) – на основі тетрагональної піраміди.

За результатами порівняння точності неортогональних надмірних вимірювальних приладів можна дійти висновку, що використовувати вимірювачі з основою у вигляді чотирьохактної піраміди підвищує точність вимірювань.

Нормовані гістограми розподілу відносно абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості показано на рис.3.3.3. Проаналізувавши гістограми можна дійти висновку, що похибки розподілені за нормальним законом. Результатом співвідношення середньоквадратичної похибки інерційного вимірювача та окремого МЕМС – датчика є значення точності вимірювань експерименту(табл. 3.3).

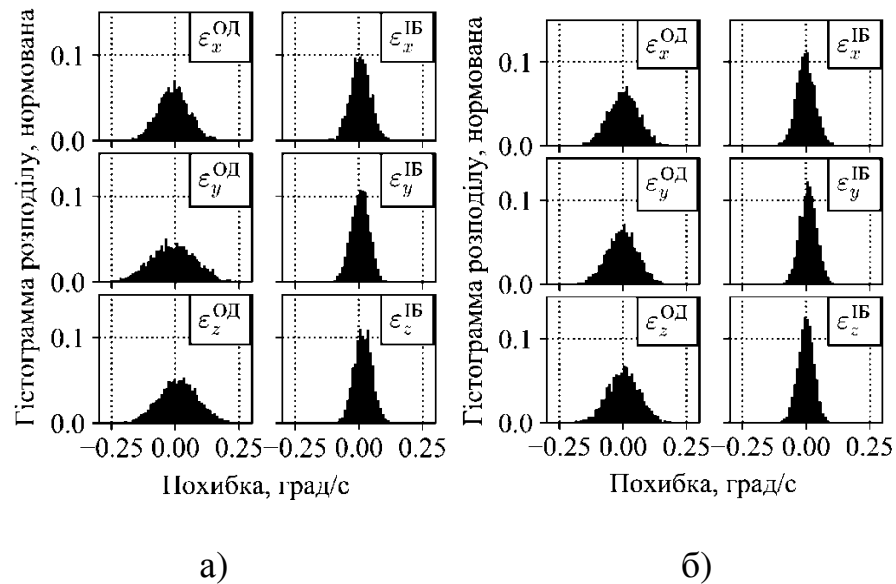


Рис. 3.3.3. Абсолютна похибка кутової швидкості визначена за допомогою неортогонального надлишкового інерційного вимірювального приладу: а - на основі трикутної піраміди; б - на основі тетрагональної піраміди

Таблиця 3.3

Результати отримані вході дослідження впливу СКВ похибки вимірювання кутової швидкості проєкції

Тип блока	$\sigma_{rel} = \sigma_i / \sigma_i^0$		
	x	y	z
Трикутна піраміда	0,6651	0,5094	0,4845
Чотирикутна піраміда	0,5481	0,4163	0,4460

Нормалізація здійснюється відносно середньоквадратичного значення ортогонального трьохосьового інерційного датчика. Відповідно до таблиці 3.3 неортогональний надлишковий вимірювальний прилад, заснований на такій конструктивній одиниці, як тетрагональна піраміда, забезпечує вищу

точність у порівнянні з вимірювальним приладом на основі трикутної піраміди для всіх осей навігаційної системи відліку.

### **3.4.Висновок**

У даному розділі був досліджений вплив похибок на точність неортогональних надмірних вимірювачів теоретичним та експериментальним шляхом за допомогою динамічного аналізу точності. У ході експерименту були враховані статистичні та температурні похибки. Результатом температурної похибки є відхилення нуля гіроскопа

Теоретичне оцінювання відбувається за допомогою матриці напрямних косинусів. Для отримання даних про точність кутової швидкості використовується слід матриці, що утворилась у результаті оптимізації методом найменших квадратів

Суть експериментального оцінювання полягає у порівнянні даних вимірювань кутової швидкості стенда і неортогонального інерційного надмірного вимірювального пристрою. Отримані результати вимірювань перетворюють у проекції кутових швидкостей на осі навігаційної системи відліку і виконують оцінювання точності.

## ВИСНОВОК

У ході дипломної роботи був проведений аналіз реалізацій мікро механічних гіроскопів з датчиками вимірювання кутової швидкості. Традиційні резонансні гіроскопи займають більшу частину ринку, оскільки їх вартість являється найоптимальнішою враховуючи їх характеристики.

Виробники гіроскопів представляють широкий вибір компонування елементів мікро механічних датчиків. Так фірма Analog Devices пропонує гіроскопи із розміщенням на одному кристалі як датчика так і системи для обробки його даних, таке компонування дозволяє уникнути зовнішніх шумів.

Надмірність мікро механічних гіроскопів необхідна для підвищення надійності та точності вимірювань, це відбувається за рахунок збільшеної кількості датчиків. Таким чином при виході з ладу одного з датчиків, вимірювальний прилад усе одно буде працювати, але з меншою точністю.

Для оцінки точності теоретично необхідно визначити слід кореляційної матриці похибок. Для визначення точності відбувається моделювання кутового руху у інерційному просторі за допомогою динамічного стенду, далі необхідно врахувати температурну та статистичну похибку, у окремих випадках для підвищення точності необхідно використовувати ЕОМ, після чого дані що отримали з експериментально стенду та дані, що отримали безпосередньо з вимірювача порівнюються та оцінюються випадкові похибки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ДЖЕРЕЛ

1. Cheng J., Dong J., Landry R.J., Chen D.A. Novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensors based on the orthogonal rotation method. *Sensors*, 2014, vol. 14(8), pp. 13661-13678.
2. Nilsson J.O., Skog I., Handel P. An open-source multi inertial measurement unit (MIMU) platform. *Inertial Sensors and Systems*
3. Sushchenko O. A., Bezkorovainyi Y. N., Novytska N. D. Nonorthogonal redundant configurations of inertial sensors, 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD).
4. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status.  
[www.invensense.com/shared/pdf/MEMSGyroComp.pdf](http://www.invensense.com/shared/pdf/MEMSGyroComp.pdf)
5. Geen J., Krakauer D. New iMEMS® Angular-RateSensing Gyroscope., ADI Micromachined Products Division.  
[www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-03/gyro.html](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-03/gyro.html)
6. Burg A., Meruani A., Sandheinrich B., Wickmann M. MEMS Gyroscopes and their Applications.  
[clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf](http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf)
7. [www.analog.com](http://www.analog.com)
8. [www.semiconductors.bosch.de](http://www.semiconductors.bosch.de)
9. [www.systronaut.com](http://www.systronaut.com)
10. [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
11. [www.spp.co.jp/sssj/](http://www.spp.co.jp/sssj/)
12. [www.melexis.com](http://www.melexis.com)
13. Алешкин М.В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной информации измерительного блока / В.В. Алешкин, А.С.

Матвеев, М.В. Алешкин // Интернет и инновации: сб.трудов Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2008. С

14. Неортогональная БИНС для малых БПЛА

<https://habr.com/ru/post/114513/>