

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Тачиніна О.М.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА НАПРЯМКОМ 6.050201 «СИСТЕМНА ІНЖЕНЕРІЯ»

**Тема: «Моделі похибок вібраційних гіроскопів та методики їх визначення»**

Виконавець: студент групи СУ-602 Суховаров Євген Олексійович  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: професор Чіковані Валерій Валеріанович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

«Охорона праці»: \_\_\_\_\_ Козлітін О.О.  
(підпис) (П.І.Б.)

«Охорона навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ Фролов В.Ф.  
(підпис) (П.І.Б.)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Чіковані В.В.  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2020

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Напрямок 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(спеціальність, спеціалізація): 6.050201, 151  
(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Тачиніна О.М.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи (проекту)**

\_\_\_\_\_ Суховаров Євген Олексійович \_\_\_\_\_  
(П.І.Б. випускника)

1. Тема роботи: «Моделі похибок вібраційних гіроскопів та методики їх визначення» затверджена наказом ректора від 08.10.2020 №1944/ст
2. Термін виконання роботи: з 1.09.2020 по 23.12.2020
3. Вихідні дані роботи: Гіроскоп з металевим резонатором добротність резонатора  $Q=22000$ , різнодобротність  $\Delta Q=1000$ , резонансна частота  $f_r=4$  кГц, різночастотність  $\Delta f=0.03$  Гц. Температура навколишнього середовища при тестуванні  $+50^{\circ}\text{C}$ .
4. Зміст пояснювальної записки: Огляд вібраційних гіроскопів, . Моделі похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнта, Метод варіації Алана для оцінки параметрів дрейфу, Застосування метода варіації Аллана для

оцінки похибок Висновки, Охорона праці, Охорона навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: таблиці, рисунки, графіки, презентація результатів роботи в PowerPoint

6. Календарний план-графік

/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
	Розділ 1. Огляд вібраційних гіроскопів	30.09.2020 р	
	Розділ 2. Моделі похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнта	20.10.2020 р	
	Розділ 3. Метод варіації Алана для оцінки параметрів дрейфу	5.11.2020 р	
	Застосування метода варіації Аллана для оцінки похибок вібраційного гіроскопа з металевим резонатором	9.12.2020 р	
	Висновки	10.12.2020 р	
	Вплив вібраційних процесів на екологію навколишнього середовища	15.12.2020 р.	
	Охорона праці	20.12.2020 р.	

7. Консультація з окремих розділів:

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього середовища			

8. Дата видачі завдання: «10.09.2020»

Керівник дипломної роботи (проекту): \_\_\_\_\_ В.В. Чіковані  
( підпис керівника) ( П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_ Є.О. Суховаров  
( підпис випускника) ( П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Моделі похибок вібраційних гіроскопів та методики їх визначення» містить: 149 с., 64 рис., 8 табл. та 6 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – вібраційні гіроскопи.

Предмет дослідження – визначення похибок кориолісних вібраційних гіроскопів, що впливають на точність вимірювання та способів їх розрахування.

Мета дипломної роботи – дослідити способі визначення похибок гіроскопів у статички та визначити ці похибки шляхом використання метода варіації Аллана стосовно до гіроскопа з металевим резонатором.

Методи дослідження – обзор літератури, теоретичні розрахування, експериментальні виміри, обробка результатів експериментів.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що метод варіації Аллана дозволяє виділити з дрейфу зміщення нуля важливі компоненти, які характеризують похибки вимірювання кутової швидкості та кута повороту в різних застосуваннях гіроскопа і особливо в автономних навігаційних системах.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати при оцінці точності гіроскопів після його виготовлення, для визначення його паспортних параметрів

Ключові слова: ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ, МЕТАЛЕВИЙ РЕЗОНАТОР, МЕМС ГІРОСКОП, ВАРІАЦІЯ АЛЛАНА, СТАБІЛЬНІСТЬ ДРЕЙФУ НУЛЯ.

## Зміст

Зміст.....	5
Перелік скорочень.....	6
Вступ.....	7
<b>Розділ 1. Огляд вібраційних гіроскопів.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Дизайн та розробка гіроскопа.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. Основний принцип роботи гіроскопу.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3. Виготовлення та випробування.....</b>	<b>29</b>
<b>Розділ 2. Моделі похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнта.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. Інерційні конфігурації системи.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2. Гіроскопи.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3. Характеристики похибок гіроскопа МЕМС.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.1. Постійне зміщення.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.2 Термомеханічний білий шум / Кут випадкового блукання.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.3. Мерехтливий шум / Стабільність зміщення.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.4. Температурний вплив.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.5 Похибки калібрування.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.6 Підсумок.....</b>	<b>50</b>
<b>2.4. Лінійні акселерометри.....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.1 Види акселерометрів (Механічний).....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.2 Види акселерометрів (Твердотілий).....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.3. Акселерометри МЕМС.....</b>	<b>54</b>
<b>2.5. Характеристики похибок акселерометра МЕМС.....</b>	<b>54</b>
<b>2.5.1 Термомеханічний білий шум / швидкість випадкового блукання.....</b>	<b>55</b>
<b>2.5.2 Мерехтливий шум / Стабільність зміщення.....</b>	<b>56</b>
<b>2.5.3 Температурний вплив.....</b>	<b>56</b>
<b>2.5.4 Похибки калібрування.....</b>	<b>57</b>

2.5.5. Підсумок.....	57
2.6. Аналіз сигналу шуму.....	58
2.6.1 Варіація Аллана.....	58
2.6.2 Приклад Аналізу по способу Аллана.....	60
2.7. Безплатформенна інерціальна навігація.....	63
2.7.1 Впровадження.....	65
2.7.2 Поширення похибок.....	66
2.7.3 Позиції відстеження.....	67
2.7.4 Приклад Mtx ІНС.....	69
<b>Розділ 3. Метод варіації Алана для оцінки параметрів дрейфу.....</b>	<b>77</b>
<b>3.1. Програма розрахунку варіації Аллана.....</b>	<b>79</b>
<b>3.2. Організація графічного призначеного для користувача інтерфейсу і результати роботи.....</b>	<b>89</b>
<b>Розділ 4. Застосування метода варіації Аллана для оцінки похибок вібраційного гіроскопа з металевим резонатором.....</b>	<b>96</b>
<b>4.1. КВГ з металевим резонатором.....</b>	<b>96</b>
<b>4.2. Опис роботи системи управління.....</b>	<b>104</b>
<b>4.3. Конструкція КВГ с металевим резонатором.....</b>	<b>105</b>
<b>4.4. Результати тестування та розрахунок варіації Аллана.....</b>	<b>105</b>
<b>Висновки.....</b>	<b>107</b>
<b>Загальний список використаної літератури.....</b>	<b>107</b>
<b>Розділ 5. Вплив вібраційних процесів на екологію навколишнього середовища.....</b>	<b>109</b>
<b>Розділ 6. Охорона праці.....</b>	<b>128</b>
<b>6.1.Поняття охорони праці.....</b>	<b>129</b>
<b>6.2. Обов'язки служби охорони праці.....</b>	<b>137</b>
<b>6.3. Загальні гарантії прав працівників на охорону праці.....</b>	<b>142</b>
<b>6.4. Організація охорони праці на підприємстві, в установі, організації.....</b>	<b>144</b>

## **Список скорочень**

**КВГ – Кориолізовий вібраційний гіроскоп**

**МЕМС – Мікроелектромеханічні системи**

**ЦАП – Цифровий аналоговий перетворювач**

**АЦП – Аналоговий цифровий перетворювач**

**ФАПЧ – Фазова автопідстроювання частота**

**МНК – Метод найменших квадратів**

**ІОВ – Інерційна одиниця вимірювання**

**ІНС – Інерційна навігаційна система**

## Вступ

Зростає кількість програм, яким потрібно збирати дані з датчиків, розташованих в середовищах з дуже високою температурою. В останні роки відбувся значний прогрес у напівпровідниках, пасивних елементах та міжмережевих з'єднаннях, щоб забезпечити високу точність збору та обробки даних. Однак, як і раніше залишаються незадоволеними потреби в датчиках, які можуть працювати при температурі до  $175^{\circ}\text{C}$ , особливо у простому у використанні форм-факторі, що забезпечується мікроелектромеханічними системами (MEMS). Датчики MEMS часто мають менший розмір, меншу потужність та нижчу вартість, ніж еквіваленти дискретних датчиків. Крім того, вони також можуть інтегрувати схему кондиціонування сигналу в один і той же напівпровідниковий пакет.

Вже випущений високотемпературний акселерометр MEMS - ADXL206, який забезпечує високу точність вимірювань нахилу (нахилу). Однак, як і раніше, необхідні додаткові ступені свободи для точного вимірювання руху системи в жорстких умовах, коли кінцевий продукт може зазнати сильних ударів, вібрації та сильного руху. Цей тип зловживань може спричинити надмірний знос та ранні збої в роботі системи, спричиняючи великі витрати на технічне обслуговування або простої.

Для задоволення цієї потреби є новий високотемпературний гіроскоп MEMS із інтегрованим кондиціонуванням сигналу, ADXRS645. Цей датчик забезпечує точне вимірювання кутової швидкості (швидкості обертання) навіть за наявності удару та вібрації та розрахований на температуру до  $175^{\circ}\text{C}$ .

Необхідно зауважити, що, хоча на меті надати широкий вступ до теми інерційної навігації, останні розділи зосереджуються головним чином на інерційних системах навісного типу з використанням мікрооброблених електромеханічних систем (MEMS). На даний момент технологія MEMS представляє особливий інтерес, оскільки вона пропонує надійні, недорогі, малі



та легкі інерційні датчики порівняно з іншими доступними технологіями. Продуктивність інерційних пристроїв МЕМС також швидко покращується. Розроблена проста інерційна навігаційна система (ІНС) на базі пристрою Xsens Mtx.

Твердотільний хвильовий гіроскоп (ТВГ) - прилад, який за принципом дії і застосування в системах орієнтації і навігації підрозділяється на ТВГ, що працюють в режимі датчика кута і ТВГ, що працюють в режимі датчика кутової швидкості. Твердотільний хвильовий гіроскоп є одним з найбільш перспективних приладів з точки зору співвідношення собівартості виготовлення і точності одержуваної інформації. При досить хорошою точності собівартість нижча, ніж у приладів з такою ж точністю. Принцип роботи приладу побудований на використанні інерційних властивостей пружних хвиль у твердому тілі.

Особливістю ТВГ є його конструкція, в якій чутливий елемент є пружним тілом у вигляді напівсферичної оболонки, що здійснює пружні коливання. Чутливий елемент має малу вагу і габарити. ТВГ не має в своєму складі обертових частин і елементів, які можуть вийти з ладу при великих амплітудах коливань.

Твердотільний хвильовий гіроскоп має переваги:

- висока точність;
- мале споживання потужності;
- конструктивна простота механічних вузлів;
- мінімальне, в порівнянні з аналогами, час готовності;
- широкий діапазон робочих температур;
- висока стійкість до механічних впливів (лінійні перевантаження, вібраційні й ударні впливи), а так само до переривання подачі електроживлення;

- тривалий термін служби.

Крім переваг ТВГ має і ряд недоліків:

- складність виготовлення напівсферичних резонаторів і металізація їх поверхонь;
- складність забезпечення співвісності між резонатором і системами знімання / збудження;
- складність балансування резонатора;
- складність усунення похибок.

Застосування ТВГ дозволяє вирішувати завдання підвищення точності, надійності, вібростійкості, ударостійкості, забезпечення можливості роботи в умовах підвищеного радіаційного фону. Володіючи рядом переваг, недоступних іншим приладам

- механічним, лазерним і волоконно-оптичним гіроскопа, у багатьох випадках для вирішення завдань управління і навігації застосування ТВГ є пріоритетним. Прилад застосовується як у військовій, так і в цивільній сферах: нафтовидобуток, системи контролю якості автомобільних і залізних доріг, управління космічними апаратами та інші.

Твердотільний хвильовий гіроскоп в режимі датчика кутової швидкості, має похибки різної природи виникнення. У ряді робіт

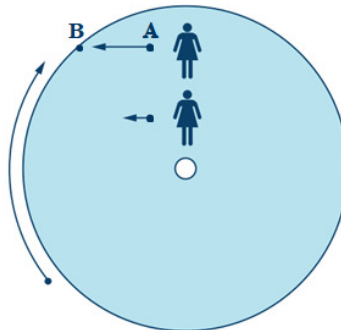
відзначається, що на достовірність оцінки самої вимірюваної величини суттєво впливають структура і характер шумових складових в каналі вимірювання. Відомо кілька методів дослідження випадкових процесів, серед них метод вибіркової дисперсії, спектральної щільності і метод варіації Аллана. Перші два не завжди дозволяють ідентифікувати джерело похибок і їх кількісний вклад в загальну статистику шуму, саме тому для вирішення подібних завдань рекомендується використовувати метод варіації Аллана.

метод варіації Аллана - це метод аналізу тимчасових послідовностей для визначення характеристик шумів як функцій усередненого часу. Метод, спочатку розвинутий для оцінки нестабільності годин в супутникових навігаційних системах, з успіхом застосовується з метою аналізу шуму для інших систем.

## Розділ 1. Огляд вібраційних гіроскопів

Гіроскопи (MEMS – мікроелектромеханічні системи) вимірюють кутову швидкість за допомогою прискорення Кориолізу. Ефект Кориоліза можна пояснити наступним чином, починаючи з рисунку 1.1. За основу даного огляду, візьмемо та розберем приклад. Вважайте себе стоячи на обертанні платформі, недалеко від центру, ваша швидкість буде вважатися відносно землі, як зазначено синьою стрілкою. Якщо ви рухаєтесь від стартової точки «А» до кінцевої точки «В», то ваша швидкість буде зростати по відношенню до землі, на що вказує більш довша стрілка. Швидкість буде зростати завдяки тангенціальній та радіальній швидкості, яка створює прискорення Кориолізу.

Якщо  $\Omega$  – кутова швидкість та  $r$  – радіус тангенціальної швидкості однакова  $\Omega r$ , то якщо  $r$  змінюється на швидкість  $v$ , це створить тангенціальне прискорення  $\Omega v$ . Це перша половина прискорення Кориолізу. Також є інші половини зі змінною напрямку радіальній швидкості, що дає у сумі  $2\Omega v$ . Якщо ваша платформа (земля) навантажена масою ( $M$ ), яка дає силу  $2M\Omega v$  для того, щоб сприяти на прискорення, та маса навантаження буде відчувати відповідну силу реакції на платформу.



**Рисунок 1.1.** Приклад прискорення Кориолізу. Людина яка рухається до краю обертаючої платформи, що збільшує цим самим рух.

<b>Кафедра АКСУ</b>				<b>НАУ 19 16 77 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	Суховаров Є.О.			<b>Огляд вібраційних гіроскопів</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
<b>Керівник</b>	Чіковані Р.Р.					12	150
<b>Консульт.</b>	Чіковані В.В.				<b>602 6.050201</b> Error! Unknown switch argument.		
<b>Н. контр</b>	Чіковані В.В.						
<b>Зав. каф.</b>	Тачішвіна О.М.						

Гіроскоп **ADXRS645** дає переваги використовуючи ефект резонуючої маси, даний ефект є аналогом руху люди на обертання платформи. За допомогою даного гіроскопу, можемо змоделювати рух людини. Маса мікрооброки з полікремнію, та прив'язана до полікремнієвої рами, може резонувати тільки в одному напрямку.

**ADXRS645** (рисунок 1.2) – високотемпературний гіроскоп, що відхиляє вібрацію, та пропонується як високоефективний датчик кутової швидкості з чудовою стійкістю до вібрацій для використання в середовищах з високою температурою до 175 °С. Розроблений із використанням великого обсягу процесу поверхневої мікрообробки **BiMOS**, у якого вдосконалена диференціальна, квадратична конструкція датчика, що забезпечує чудове прискорення та відхилення вібрацій. Вихідний сигнал **RATEOUT**, є напругою пропорційно–кутової швидкості навколо вісі.

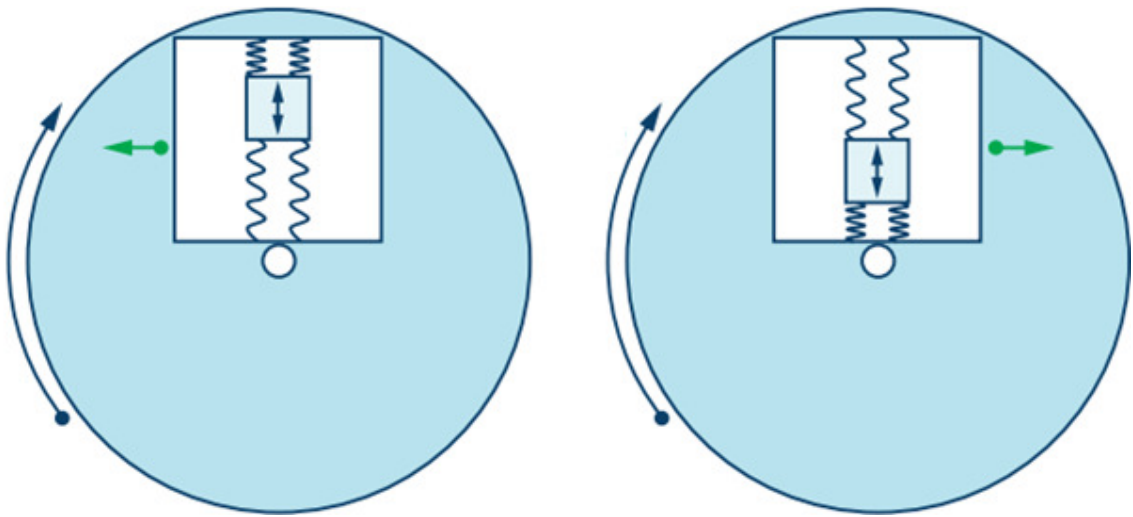
Діапазон вимірювань становить мінімум  $\pm 2000$  ° / секунду, та може бути розширений до максимуму  $\pm 5000$  ° / секунду з додаванням одного зовнішнього резистора. Для роботи потрібні інші зовнішні конденсатори. **ADXRS645** включає в себе: температурний вихід для методів компенсації, має два цифрових входи для самотестування електромеханічних збуджень датчиків, щоб перевірити правильну роботу як датчика, так і ланцюгів кондиціонування сигналу.



**Рисунок 1.2.** Гіроскоп **ADXRS645**

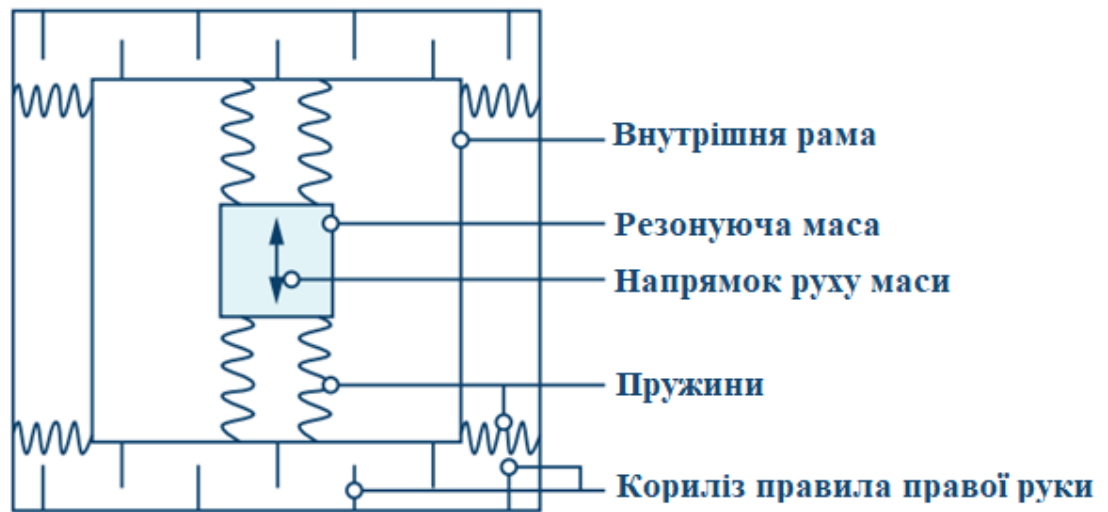
Коли резонансна маса рухається до зовнішнього краю обертання, вона прискорюється вправо і надає на раму реакційну сили вліво. Коли він рухається

до центру обертання, він надає силу вправо, про що свідчать зелені стрілки (рисунок 1.3).



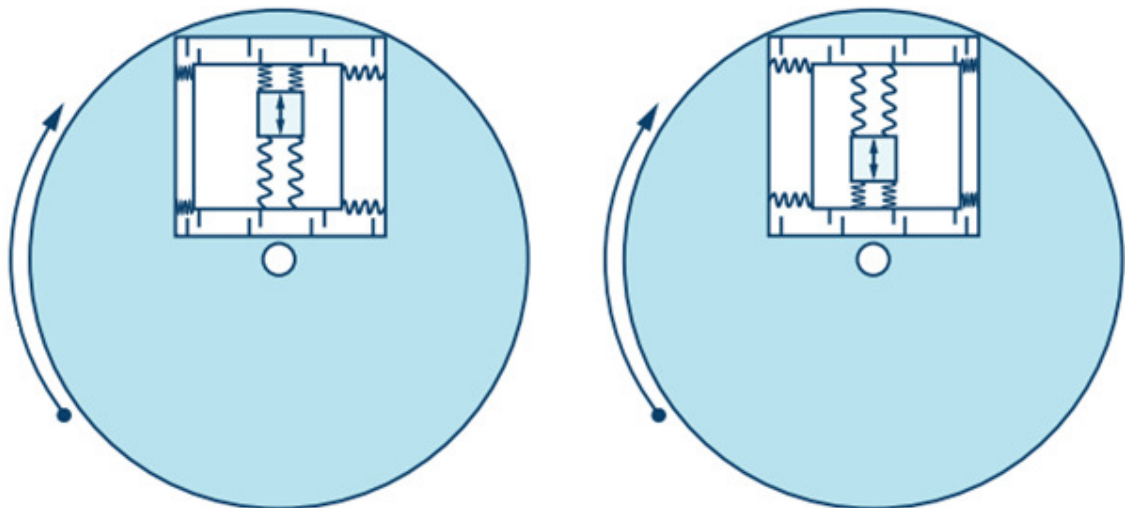
**Рисунок 1.3.** Демонстрація ефекту Кориоліза на резонуючу масу, що підвішена всередині рами. Зелені стрілки вказують на силу, що прикладена до конструкції на основі впливу резонуючої маси.

Для вимірювання прискорення Кориолізу, рама, що містить резонуючу масу, прив'язується до субстрату пружинами на  $90^\circ$  по відношенню до резонансного руху, як зазначено на рисунку 1.3. На рисунку 1.4 показує Кориоліз при використанні правила правої руки, яке використовуються для визначення зміщення рами через ємнісну трансдукцію у відповідь на силу, яка сприяє на масу.



**Рисунок 1.4.** Схематична будова гіроскопа

Рисунок 1.5, демонструє повну структуру, що при переміщенні резонуючої маси та обертання поверхні, на якій встановлений гіроскоп, маса та її рама відчують прискорення Кориолізу, та переносяться на  $90^\circ$  від вібраційного руху. Зі збільшенням швидкості обертання, змінюється зміщення та сигнал, що отриманий відповідною ємністю. Необхідно відмітити, що гіроскоп, може бути розміщений в будь-якій точці на обертовому об'єкті та під будь-яким кутом, якщо його вісь паралельна вісі обертання.



**Рисунок 1.5.** Конструкція (рама) та резонуюча маса зміщуються в бік на вплив на ефект Корилізу

**ADXRS645** вимірює зміщення резонуючої маси та її рами за рахунок ефекту Кориоліза за допомогою ємнісних елементів, приєднаних до резонатора, як зазначено на рисунку 1.5. Ці елементи є кремнієвими пучками, розділені двома наборами нерухомих кремнієвих балок, прикріплених до основи, таким чином утворюючи два рівні конденсатори. Зміщення через кутову швидкість викликає диференціальну ємність у цій системі.

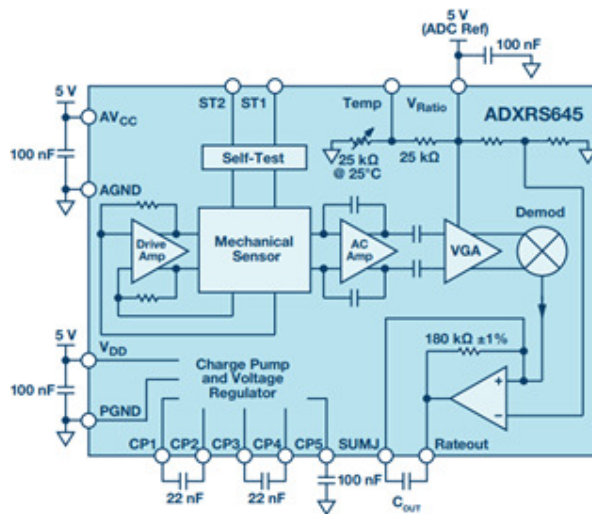
Прискорення Кориоліза є надзвичайно малим сигналом, що виробляє частки Ангстремів відхиленні променем та відповідні зміни виникають за рахунок ємності пєптофарадів. Тому важливо мінімізувати перехресну чутливість до паразитних джерел, таких як температура, напруга, зовнішнє прискорення та електричний шум. Це частково досягається розташуванням електроніки, включаючи підсилювачі та фільтри, на тій же матриці, що і механічний датчик. Однак важливіше проводити диференціальні вимірювання якомога далі по ланцюжку сигналів і співвідносити сигнал зі швидкістю резонатора, особливо для розгляду наслідків зовнішнього прискорення.

В кращому випадку, гіроскоп повинен був би бути чутливим лише до швидкості обертання і нічого іншого. На практиці всі гіроскопи мають певну чутливість до прискорення через асиметрію їх механічних конструкцій або неточності мікрообробки. Насправді, існує безліч проявів чутливості до прискорення – ступінь вираженості яких залежить від проектування. Найбільш значущими є, як правило, чутливість до лінійного прискорення (або чутливість  $g$ ) та випрямлення вібрацій (або чутливості  $g^2$ ) і можуть бути досить серйозними, щоб повністю перекрити номінальну стабільність зміщення деталі. Вихід деяких гіроскопів змінюється від рейки до рейки, коли вхідна швидкість перевищує номінальний діапазон вимірювань. Інші гіроскопи мають тенденцію замикатися під впливом ударів розміром лише кілька сотень  $g$ . Ці гіроскопи не пошкоджуються ударом, але вони більше не реагують на швидкість і для перезапуску їх потрібно активувати.



**ADXRS645** використовує новий підхід до зондування кутової швидкості, що дає змогу відкидати удари до 1000 g – він використовує чотири резонатори для диференціального розпізнавання сигналів і відкидання загально-режимних зовнішніх прискорень, які не пов'язані з кутовим рухом. Верхні та нижні пари резонаторів (на рисунку 1.6) механічно незалежні і працюють анти-фазно. В результаті вони вимірюють однакову величину обертання, але дають виходи в протилежних напрямках. Тому різниця між сигналами датчика використовується для вимірювання кутової швидкості. Це скасовує обертальні сигнали, які впливають на обидва датчика. Сигнали поєднуються у внутрішній проводці, що знаходиться перед підсилювачем. Таким чином, надзвичайні перевантаження та прискорення значною мірою не дозволяють потрапити до електроніки – тим самим дозволяючи системі кондиціонування, та зберігати кутову швидкість під час великих навантажень.

Схема резонатора відчуває швидкість резонуючої маси, посилює і приводить в дію резонатор, зберігаючи добре контрольовану фазу, щодо відношення сигналу Кориоліза. Схема Кориоліза використовується для виявлення руху рам акселерометра з обробкою сигналу для вилучення величини прискорення Кориоліза та отримання вихідного сигналу, що відповідає швидкості вхідного обертання. Крім того, функція самоперевірки (самотестування) перевіряє цілісність усього ланцюжка сигналів, включаючи датчики (рисунок 1.6).



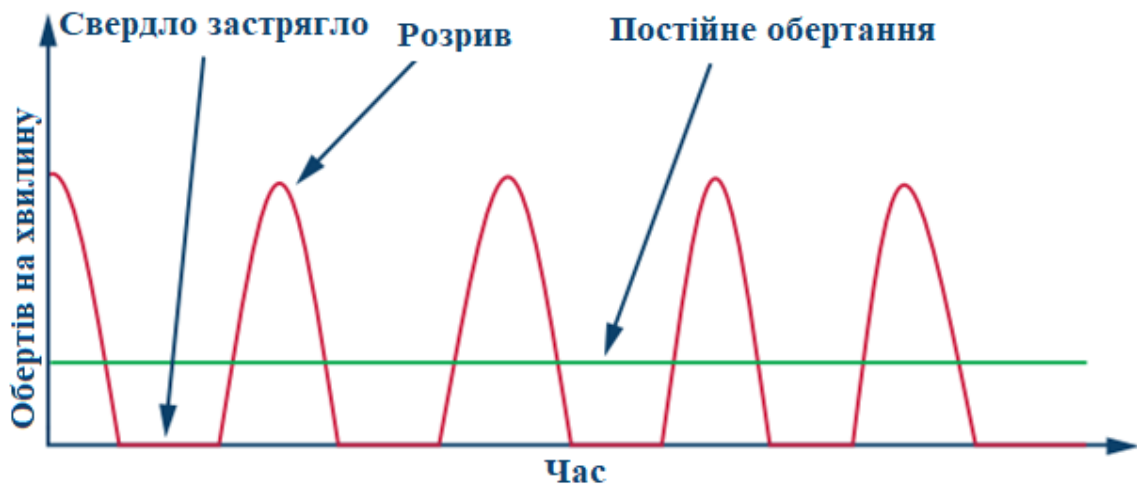
**Рисунок 1.6.** Структурна схема гіроскопа

Розглянемо приклад застосування. Можливо, одне з найсуворіших середовищ для електроніки зустрічається в нафтогазовій свердловинній промисловості. У цих системах використовується безліч датчиків, щоб краще зрозуміти рух бурильної колони під поверхнею, оптимізувати операції та запобігти пошкодженню. Швидкість обертання свердла, виміряна в об./хв., є ключовою метрикою, яку оператор свердла повинен знати постійно. Традиційно це розраховували за допомогою магнітометрів. Однак магнітометри схильні до впливу чорних матеріалів, що знаходяться в корпусі бура та навколишній свердловині. Вони також повинні розміщуватися в спеціальних немагнітних бурових комірцях (корпусах).

Окрім простих вимірювань частоти обертання, зростає інтерес до розуміння руху бурильної колони або динаміки буріння для оптимального управління такими параметрами, як величина прикладеного зусилля, швидкість обертання та рульове управління. Погано керована динаміка буріння може призвести до високих вібрацій та надзвичайно нестабільного руху бура, що призводить до збільшення часу буріння до цільової зони, передчасного виходу обладнання з ладу, труднощі у рульовому керуванні долотом та пошкодження самої свердловини. У крайньому випадку обладнання може бути зламане і

залишено в свердловині, що потім потрібно відновлювати за дуже високу вартість.

Один особливо шкідливий тип руху, спричинений поганим управлінням параметрами буріння, відомий як ковзання. Ковзання – це явище, коли свердло застряє, але верх бурильної колони продовжує обертатися. Поки долото застрягло, дно бурильної колони звивається, поки не створює достатньо крутного моменту, щоб розірватися. Коли це трапляється, на свердлі відбувається великий стрибок швидкості обертання. Ковзання палички, як правило, відбувається циклічно і може тривати протягом тривалого періоду часу. Типова реакція обертів на хвилину від ковзання палиці показана на рисунку 1.7. Оскільки бурова колона на поверхні продовжує стабільно обертатися, оператори буріння часто не знають, що це руйнівне явище



від  
бу  
ває  
тьс  
я в  
сер  
ед  
ині  
све  
рд

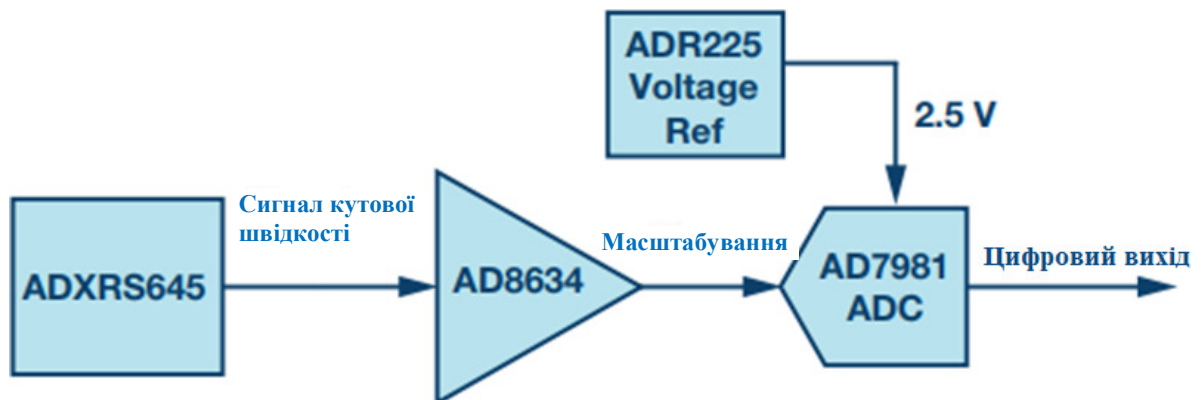
ловини.

**Рисунок 1.7.** Приклад циклічного об./хв. із ковзанням

Критичним виміром для цього застосування є точне вимірювання швидкості обертання біля свердла (з високою частотою дискретизації). Для цього завдання ідеально підходить такий вібраційний

гіроскоп, як ADXRS645, оскільки вимірювання відокремлення від будь-якого лінійного руху бурильної колони. Швидкість обертання, розрахована за допомогою магнітометрів, піддається шуму та помилкам при сильних вібраціях та нестабільному русі. Рішення на основі гіроскопа дає миттєву відповідь на швидкість обертання і не залежить від нульових перетинів чи інших алгоритмів, на які можуть впливати удари та вібрація.

Крім того, схема на основі гіроскопа простіша та вимагає меншої кількості компонентів, ніж рішення ферозондового магнітометра, який вимагає декількох осей магнітометра та додаткових схем приводу. Обробка сигналу вбудована в ADXRS645. Підтримуючі високотемпературні мікросхеми для відбору та оцифрування аналогового виходу гіроскопа доступні з низькою потужністю та низьким рівнем контактів. Схема гіроскопа з цифровим виходом, розраховано на 175 °С, це може бути реалізовано за допомогою спрощеного ланцюга сигналів, показаного на рисунку 1.8.



**Рисунок 1.8.** Цифровий вихідний сигнальний ланцюга гіроскопа з температурою 175 °С

### 1.1. Дизайн та розробка гіроскопа

Датчики MEMS приділяли значну увагу протягом останнього десятиліття. Збільшилась кількість пропозицій на менші та недорогі гіроскопи або датчики кутової швидкості, завдяки появі нових споживчих та автомобільних продуктів, що вимагають інформації про кутову швидкість. Обертково–колісні гіроскопи, волоконно–оптичні гіроскопи та лазерні гіроскопи широко використовувались для інерційної навігації та системи наведення. Однак вони дуже громіздкі і дорогі для нових програм, незважаючи на їх підвищення продуктивності протягом багатьох десятиліть. Програми для яких потрібен менший та дешевий гіроскоп в продуктах безпеки автомобілів (протиковзні системи, ABS, системи подушок безпеки), споживчі товари (3D–навігатор, відеокамера, GPS, спортивне обладнання), промислові товари (роботи, машини, транспорт, керовані транспортні засоби), медичні вироби (інвалідні візки, хірургічні інструменти, моніторинг руху тіла) та військові продукції (розумні боєприпаси, нові системи зброї). Мікросенсори, що складаються з механічних та електричних елементи зазвичай називають мікроелектромеханічними системами (MEMS). Прилади поверхневої акустичної хвилі (SAW), розроблені на початку 1960–х років, вважаються найдавнішим типом MEMS, оскільки вони використовують електричні сигнали генерувати механічні хвилі, і навпаки.

Як правило, вони мають переваги: легка вага, малий розмір, мале споживання енергії та низька вартість завдяки стандартним технологіям виготовлення ІС. За допомогою цих переваг, дослідження в гіроскопах MEMS було пришвидшено, а продуктивність гіроскопів MEMS стали більш вдосконалені. Більшість гіроскопів MEMS на основі кремнію вібраційні датчики, які використовують передачу енергії між двома режимами вібрації механічної конструкції. Отже, для досягнення високої чутливості важливо, щоб два коливальні режими були легко передані один від одного з високим  $Q$  під час обертання. Зазначимо, також потрібні зусилля щодо проектування та виготовлення резонуючих структур для досягнення роздільної здатності та

пониженню градусів в секунду. Попит на більш ефективні гіроскопи MEMS неухильно зростає. Однак тут є невід'ємне обмеження продуктивності для діючих гіроскопів MEMS, через їх принцип роботи, який заснований на вібрації підвісна механічна конструкція, тобто гребінчаста конструкція, балка, дискові або кільцеві структури. Часто буває складно і дорого виготовляти механічні конструкції з відповідним резонансом частоти двох режимів. Вартість кінцевої продукції може збільшитися за рахунок електроніки, необхідної для управління та виявлення стану резонуючої структури. Крім того, підвішена вібраційна механічна структура стає чутливою до зовнішніх ударів та вібрацій, оскільки конструкція не може бути жорстко закріплена до основи для її резонансної вібрації. Це обмежує діапазон застосування та продуктивності.

Побудований гіроскоп базується на комбінації поверхневого акустичного хвильового резонатора (SAW-R) та датчиком поверхневих акустичних хвиль (SAW-S), який працює в режимі Релея. Хвиля Релея – це хвиля енергії, яка сконцентрована в межах однієї довжина хвилі поверхневої підкладки. Переміщення частинок біля поверхні завдяки хвилі Релея мають рух поза поверхнею, який простежує еліптичний шлях. Хвиля Релея може генеруватися на поверхні п'єзоелектричного матеріалу, подаючи напругу на міжпальцевий перетворювач (IDT).

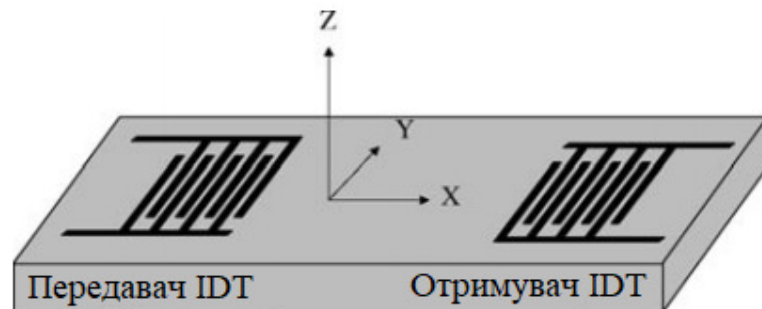
Цей гіроскоп SAW працює за принципом вібрації частинок, внаслідок стоячих хвиль Релея. Для гіроскопа SAW-R, створеного для підвищення механічної жорсткості структури. Отже, він більш стійкий до зовнішніх ударів та вібрацій. В наслідок цих переваг, цей гіроскоп лише вимагає один або два етапи літографії та металізації при виготовленні, використовуючи стандартні методи виготовлення ІС.

## **1.2. Основний принцип роботи гіроскопу**

Пристрій SAW використовується як датчик, фільтр та генератор. На рисунку 1.9 показана типова затримка SAW для якої IDT діє як передавач, який

перетворює зміни напруги в акустичних хвилях. Інший IDT приймає ці акустичні хвилі і перетворює їх назад у вихідну напругу. Ця взаємність дозволяє використовувати IDT як передавач SAW або приймач. Для цього гіроскопа затримки SAW використовується як приймач для зондування акустичних хвиль, створені ефектом Кориоліза, коли цей гіроскоп під дією обертання.

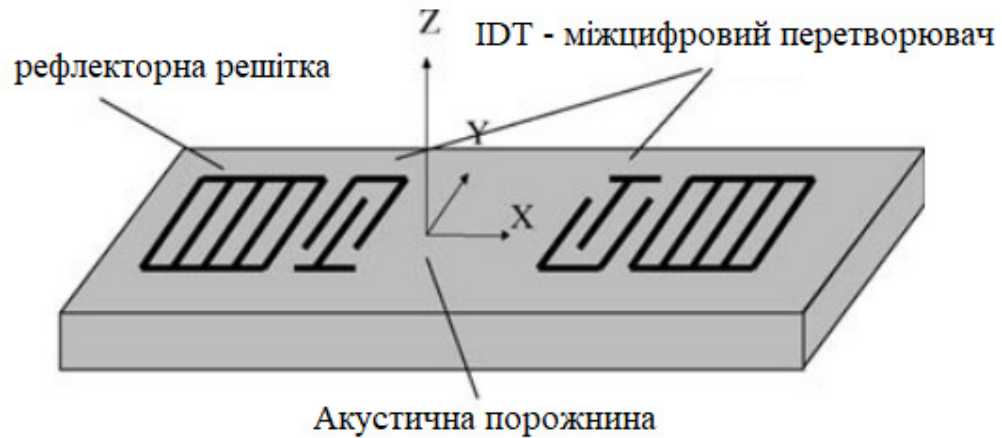
SAW–R широко використовуються для стабільності частоти вібрації та для резонансних фільтрів внаслідок їх міцності на невеликий розмір порівняно з резонаторами на іншій основі. SAW–R використовується як джерело стабільної еталонної вібрації для цього гіроскопа, оскільки будь-який механічний гіроскоп повинен мати стабільний еталонний вібраційний рух ( $V$ ) маси ( $m$ ) такої, що кутове обертання ( $\Omega$ ) перпендикулярне до опорного руху ( $V$ ), що спричинить сили Кориоліза в частоті опорного руху. Тому ефект сили Кориоліза ( $F = 2mV \times \Omega$ ) може бути мірою швидкості обертання. Методи зондування ефекту Кориоліза зазвичай є ємнісними або п'єзоелектричними. SAW гіроскоп використовує п'єзоелектричний ефект через IDT.



### 1.9. Типовий датчик SAW

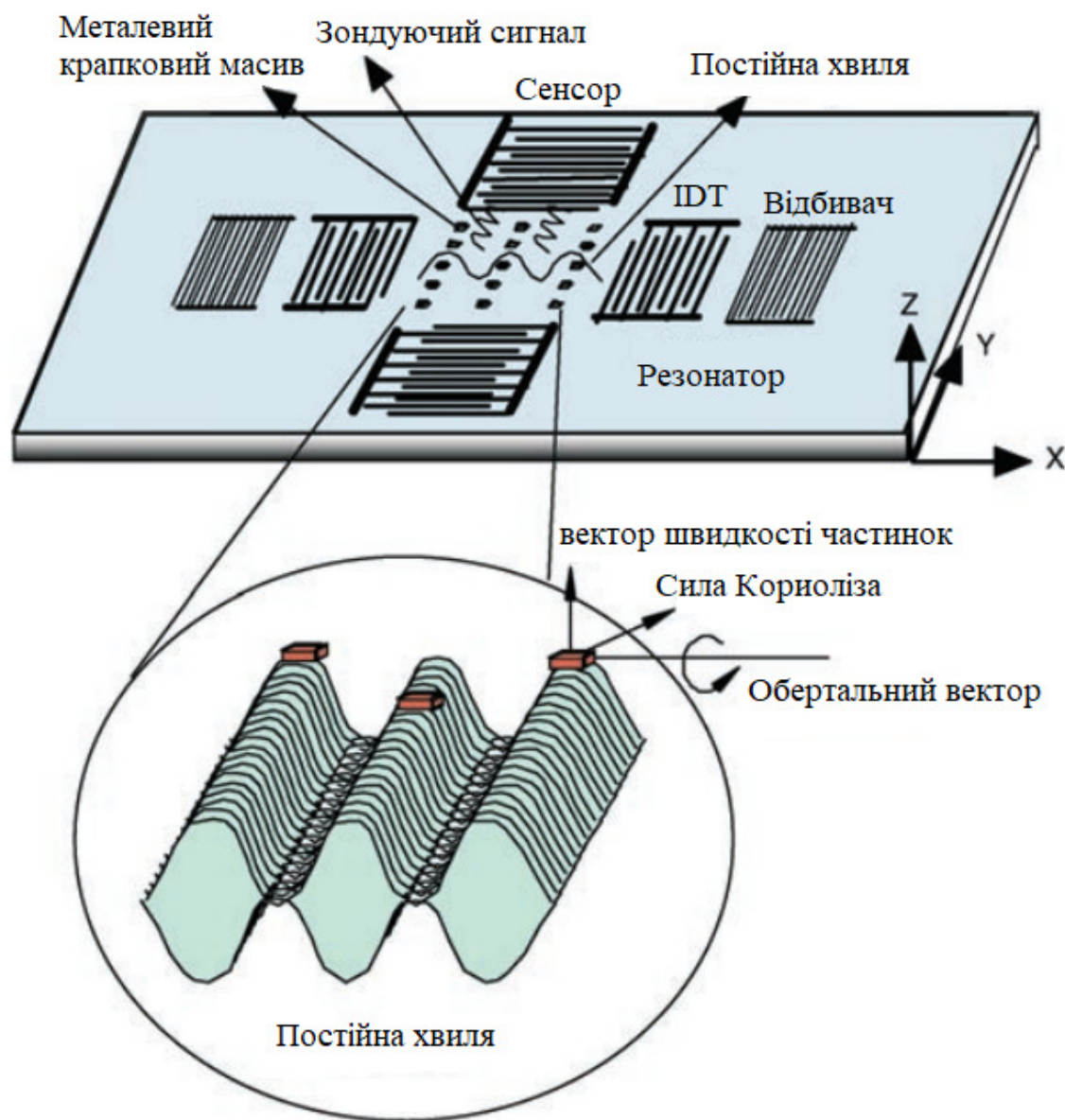
Цей гіроскоп SAW є інтеграцією SAW–S (рисунок 1.9) та SAW–R (рисунок 1.10), де SAW–R потрібно для збудження стійкого опорного вібраційного руху та SAW–S необхідний для виявлення ефекту Кориоліза. Як показано на рисунку 1.11, цей гіроскоп складається з IDT, відбивачів та металевих точкових масивів усередині порожнини. IDT, відбивачі та металеві

крапкові масиви виготовляються наскрізь методи мікровиготовлення на поверхні п'єзоелектрика. Резонатор IDT створюють SAW, що поширюються вперед–назад між відбивачами і формують постійну хвилю в порожнині завдяки колективному відображенню від рефлекторів. SAW з окремих металевих смуг додається у фазу, якщо періодичність відбивача дорівнює половині довжини хвилі.



**1.10.** Типовий резонатор SAW





### 1.11. Основний принцип роботи гіроскопу MEMC SAW

Для встановленого характеру постійної хвилі, типова частинка у вузлах постійної хвилі не має амплітуди деформації в напрямі Z. Однак біля анти-вузлів постійної хвильової частинки мають більші амплітуди вібрація в напрямку Z, яка служить еталоном вібраційного руху для цього гіроскопа. Для того, щоб акустично посилювалась величина сили Кориоліза, металеві крапки (довільна маса) розташовані стратегічно на анти-вузлах. Поворот (напрямок x), перпендикулярний до швидкості ( $V$  в напрямку  $\pm z$ -напрямку) коливальних мас ( $m$ ) виробляє силу Кориоліза ( $F = 2 mV \times \Omega$ , в напрямку  $\pm y$ ) у напрямку,

перпендикулярному до обох векторів, як показано на рисунку 1.11. Ця сила Кориоліза встановлює SAW в напрямі тієї ж частоти, що і опорне коливання.

Металевий крапковий масив розміщений вздовж напрямку «у», що SAW завдяки силам Кориоліза складається послідовно. Згенерований SAW реєструє розміщені IDT–детекторами у напрямку «у». Частота пристрою визначається поділом між рефлекторними решітками, періодичністю відбивача та IDT. Розділення між відбивачами було основане як ціле число напівхвиль, таких що постійні хвилі створюються між обома відбивачами, періодичність IDT була обрана як довжина напівхвилі ( $\lambda / 2$ ) SAW. Отже, для даного матеріалу швидкість SAW та бажана частота,  $f_0$ , визначає періодичність IDT. Швидкість SAW можна знайти з практичних або з теоретичних розрахунків для стану вільної поверхні та заданою умовою, та системи координат. Однак для цього гіроскопа, експериментально вимірювали ефективні швидкості SAW в X та Y напрямках, оскільки пристрій використовує хвилю поширення в цих напрямках і вплив металу крапкового масиву на швидкостях в обох напрямках не повністю відомі. Для вимірювання ефективних швидкостей хвиль в обох напрямках двох вузькосмугових наборів IDT з однаковою періодичністю, які розміщувались у X та Y напрямках, включаючи точковий масив посередині. Швидкість хвилі різна в X та Y напрямках завдяки анізотропії.

Для зменшення ефекту металевого крапкового масиву всередині SAW–R, вибрано розмір кожної крапки в масиві такі, що вони є достатньо меншими, ніж довжина хвилі в обох напрямках. Оскільки амплітуди постійних хвиль залежать від демпфування речовини та електромеханічні трансдукційні, передавальні та зондуючі IDT є розміщені так, що вони розташовані в максимумах постійної хвилі з метою зменшення втрат при трансдукції. Щоб отримати кращу продуктивність резонатора з цим високим коефіцієнтом, отвір IDT та кількість пальців IDT були мінімізовані, але були достатньо великими, щоб уникнути акустики дифракції. Крім того, більший інтервал між IDT був обраний,

порівняно зі звичайними резонаторами, оскільки електромагнітного зв'язку між IDT слід уникати, та всередині має бути розміщено достатньо металевих крапок

для ефекту Кориоліза. Електромеханічний коефіцієнт зв'язку і діелектрична проникність визначає електричний опір гіроскопу. Таким чином, інтервал та кількість IDT були обрані як компроміс між різними вимоги. Крім того, відповідність опору проводили із використанням серійних індукторів або трансформаторів, оскільки цей гіроскоп в основному є ємнісним завдяки розташуванню пальців IDT.

Первинний дизайн цього гіроскопа SAW (Superficial Acoustic Wave) було включено в окреме дослідження як резонатор, так і лінії затримки. Обов'язково знати характеристику опору пропускної здатності, пропускна здатність та чутливість зондуючих IDT, частоти SAW резонатора, оскільки зондуючі IDT повинні бути спроектовані так, що вони ефективно підбирають SAW, що генеруються з силами Кориоліза. Передбачається, що оптимальна конструкція лінії затримки і резонатор переведеться на ефективний дизайн гіроскопа, якщо він впливає на металевий крапковий масив на резонатор, з мінімальною силою.

Сенсорні IDT гіроскопи, які розташовані перпендикулярно резонатору, були сконструйовані наскрізь типових ліній затримки SAW і функція передачі фільтра обчислення. Відповідь рядка затримки в частотну область можна отримати за допомогою передавальної функції як зазначено нижче.

Провідність і сприйнятливість випромінювання кожного IDT можна записати так:

$$G_a = 8N_p^2 K^2 f_0 C_s \left| \frac{\sin \left[ \frac{N_p \pi (f - f_0)}{f_0} \right]}{\frac{N_p \pi (f - f_0)}{f_0}} \right|^2 \quad (1.1)$$

$$B_a = 8N_p^2 K^2 f_0 C_s \left| \left( \sin \left[ \frac{N_p \pi (f - f_0)}{f_0} \right] - \left[ \frac{N_p \pi (f - f_0)}{f_0} \right] \right) \left( \left[ \frac{N_p \pi (f - f_0)}{f_0} \right]^2 \right)^{-1} \right| \quad (1.2)$$

де  $N_p$  – кількість хвиль у кожному IDT,  $K^2$  – коефіцієнт зчеплень (зв'язків), а  $C_s$  – ємність на парну кількість хвиль. Дано вхідні та вихідні допуски кожного IDT

$$y_{ii} = G_a + i(B_a + \omega C_T) \quad \omega \neq \omega_0 \quad (1.3)$$

$$y_{ii} = G_a + i(\omega C_T) \quad \omega = \omega_0 \quad (1.4)$$

де  $C_T$  – загальна ємність IDT.

Допуск до передачі може бути таким:

$$y_{ij} = G_0 N M e^{-i\omega\tau_0} \quad \omega = \omega_0 \quad (1.5)$$

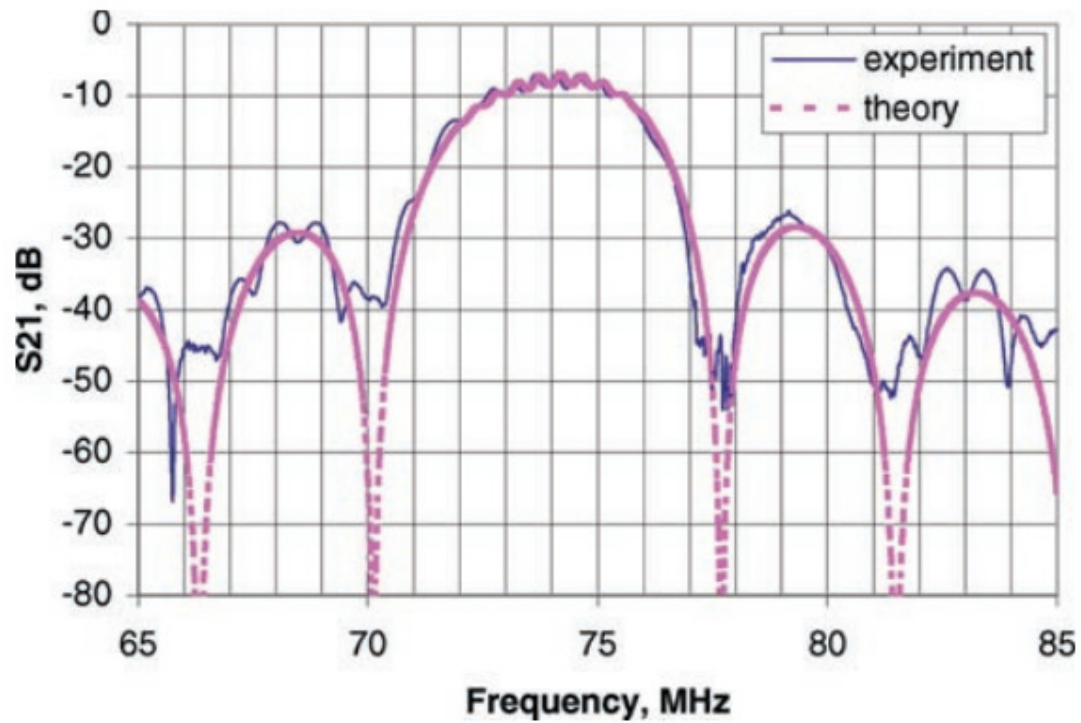
$$y_{ij} = G_0 N M \frac{\sin\left(\frac{\pi N(\omega - \omega_0)}{2\omega_0}\right)}{\frac{\pi N(\omega - \omega_0)}{2\omega_0}} * \frac{\sin\left(\frac{\pi M(\omega - \omega_0)}{2\omega_0}\right)}{\frac{\pi M(\omega - \omega_0)}{2\omega_0}} e^{-i\omega\tau_0} \quad \omega \neq \omega_0 \quad (1.6)$$

де  $N$  і  $M$  – кількість пар хвиль на вході і виході IDT.

Функцію передачі можна записати таким чином, як:

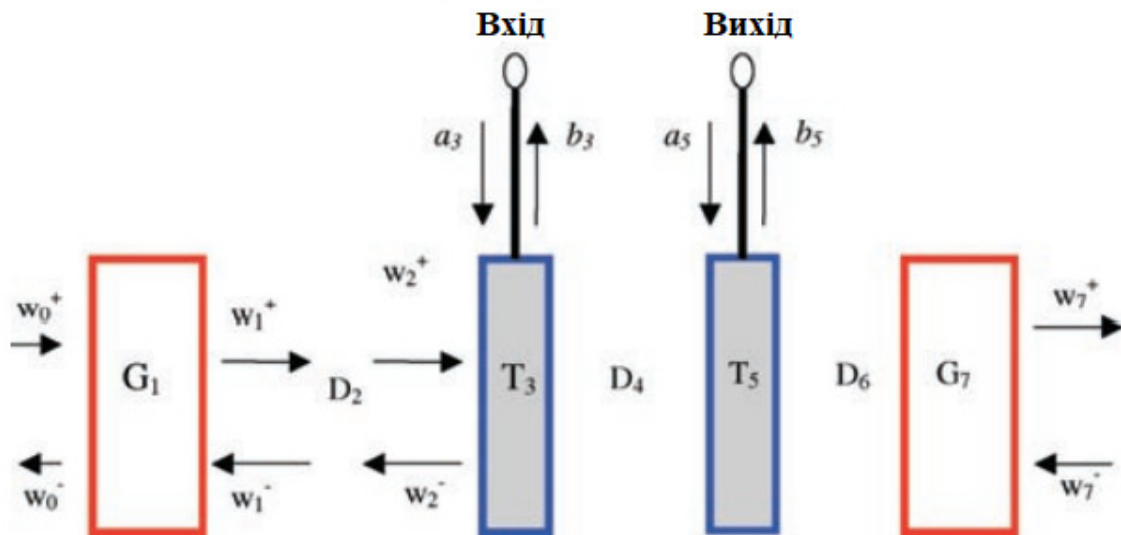
$$A = \frac{(y_1 + y_2)y_{12}}{y_{12}^2 - (y_1 + y_{11}) - (y_2 + y_{22})} \quad (1.7)$$

де  $y_1$  і  $y_2$  – джерело та допуск навантаження та  $y_{12}$ ,  $y_{11}$  та  $y_{22}$  –



пер  
еда  
вал  
ьна  
вхід  
на  
та  
вихі  
дна  
доп  
уст  
имі  
сть  
IDT

**Рисунок 1.12.** Обчислення та вимірювання продуктивності SAW та лінії затримки



**Рисунок 1.13.** Схематичне зображення SAW-R

На рисунку 1.12 представлені теоретичні та експериментальні результати лінії затримки SAW. Прогнозування лінії затримки, висновок був цілком задовільним з точки зору пропускну здатності та втрата вставки, хоча невелика понижена передача операційної частоти та втрата вставки існують.

Реакцію резонатора вивчали за допомогою теорії сполучення мод (COM). Як показано на рисунку 1.13, двопортовий резонатор можна представити в термінах його матриці компонентів. Матриця  $G$  являє собою відбивачі SAW, матриця  $\tau$  являє собою залежність між електричними та акустичними параметрами та  $D$ -матриця представляє акустичний простір між IDT та відбивача. Можна застосовувати граничні умови, припускаючи, що ззовні не надходять хвилі відбивачів та опору, що відповідають електричним термінали. Потім відповідь першого порядку двопортового резонатора, можна отримати, вирішивши такі рівняння:

$$[W_5] = [D_6][G_7][W_7] \quad (1.8)$$

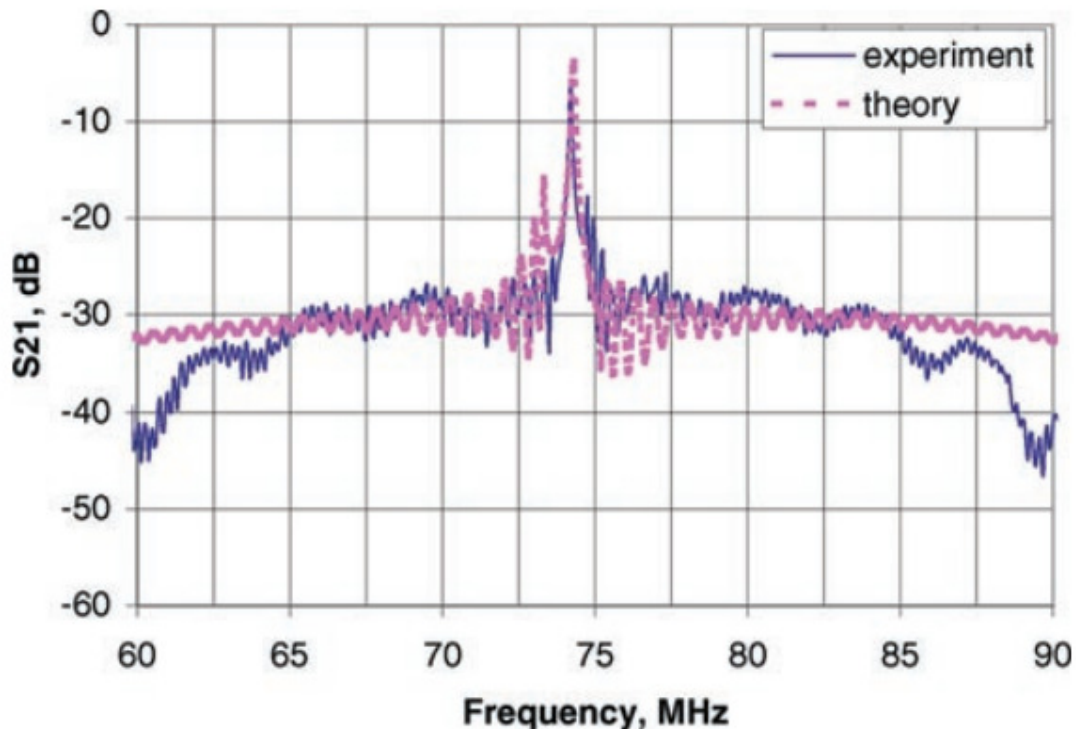
Застосовуючи згадані вище ідеальні граничні умови,

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ \omega_0 \end{Bmatrix} = [M] \begin{Bmatrix} \omega_7^- \\ 0 \end{Bmatrix} + a_3 [G_1] [D_2] [\tau_3] \quad (1.9)$$

Вихідну напругу з IDT можна записати так:

$$V_{out} = b_5 = [\tau'] [W_5] \quad (1.10)$$

Оцінювали передавальні функції IDT, а експериментальний результат порівнювали з теоретичними прогнозами за допомогою теорії COM. На рисунку 1.14 показано порівняння між теоретичними прогнозами та експериментальними результатами резонатора. Помилки в резонансній частоті та втрати вставки були спричинені існуванням металевої точкової решітки та незначними невідповідностями опору між електричними та акустичними



пор  
там  
и.

1

.14.  
Об  
чис  
лен  
ня  
та  
ви  
мір  
юв

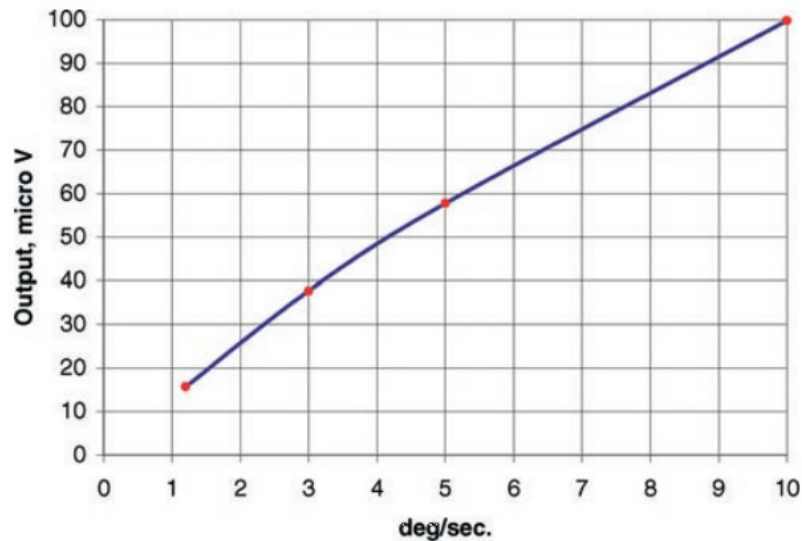
ання продуктивності SAWR

### 1.3. Виготовлення та випробування

Гіроскопи виготовляли на заводі з нано-виробництва за допомогою техніки «lift-off», так реактивного іонного травлення (RIE – Reactive Ion Etching). Техніка «lift-off», була адекватною для гіроскопів 75 МГц, які мають мінімальний розмір характеристики приблизно 6  $\mu\text{m}$ . Для того ж типу фоторезисту звикли встановити шаблон гіроскопа, позитивний чи негативний, маска що використовується для RIE та «lift-off» відповідно. Початковий шар хрому наноситься як адгезія промотор на підкладці ніобату літію перед нанесенням покриття з додатковим шаром золота. Оброблені облатки згодом були кубиками, а окремі пристрої, встановлені на мікросхемі для тестування. Гіроскопи були з'єднані дротом і запечатані провідником, щоб ізолювати їх від навколишнього шуму. Потім пристрій було встановлено на розроблену друковану плату, яка містить вбудовану схему генератора. Слід зазначити, що цей гіроскоп не був герметично закритий в першу чергу. Початкове тестування пристрою було виконується за допомогою мережевого аналізатора HP 8510C.

Реакцію гіроскопа SAW оцінювали за допомогою набіру таблиць тарифів та набір геофонів. Сигнал гіроскопа, зумовлений силою Кориоліза, що поширюється у напрямку до SAWS, який виходить разом з дифракційними сигналами від резонатора. Можна розділити зв'язаний сигнал з сигналу гіроскопа з використанням фазового детектування. Вихід гіроскопа підключений до HP динаміка, аналізатор сигналу через підсилювач, що замикається на радіочастоті (ВЧ). Були проведені початкові вимірювання гіроскопа використання таблиці швидкостей для постійних коливань. Гіроскоп фіксує на таблиці тарифів та, надаючи постійну частоту, переводить дані у таблицю показників коливань та виходу гіроскопа, що вимірюється. Амплітуда та частота руху, що контролює сигнал амплітуди коливань, що в свою чергу варіює швидкість обертання. На рисунку 1.15 показано вимірювану вихідну напругу від гіроскопа SAW для різних швидкості обертання.





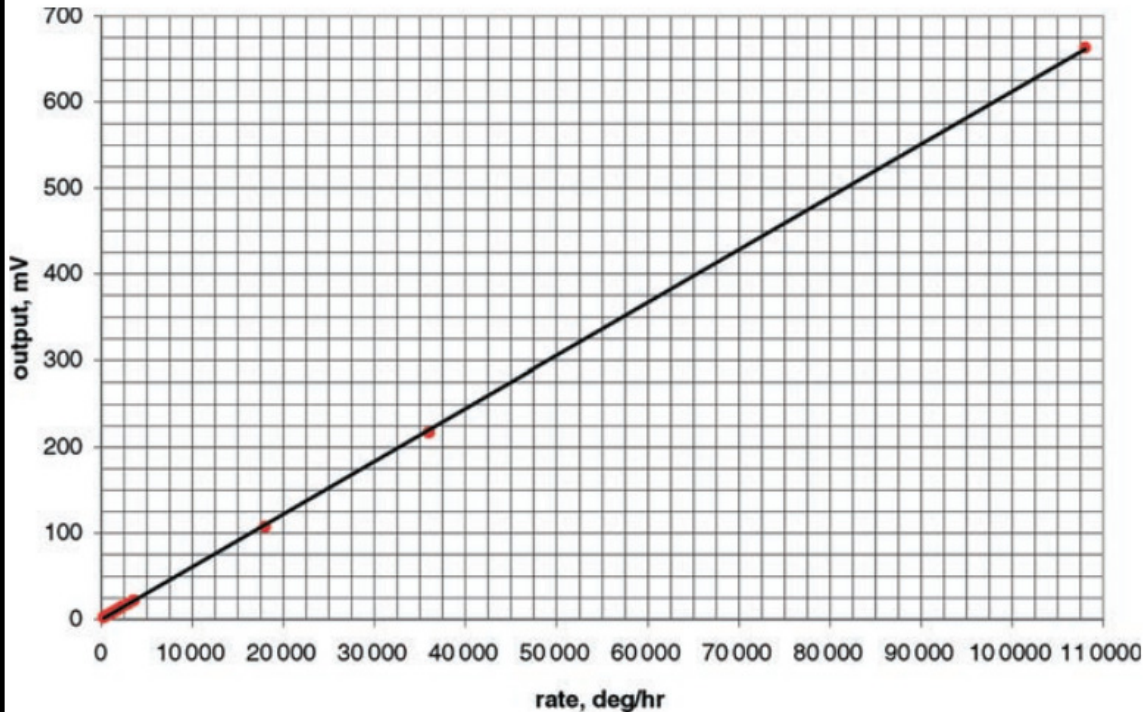
### 1.15. Вимірювання реакції гіроскопа

Через труднощі керування при менших показниках додатково вимірювали чутливість гіроскопа за допомогою установки геофон–маятника. Два геофони розташовані на протилежному кінці прямокутної платформи, що служить для налаштування горизонтальних коливань та іншої пари геофонів вловить коливання таблиці. Платформа підвішена на чотирьох кутах за допомогою гнучких струн. Гіроскоп був встановлений в центрі горизонтальної платформи, вирівнявши її вісь X так, щоб вона могла колитися вертикально вісі платформи. Геофони використовують для генерування та вимірювання обертання маятника при цьому вихідний сигнал від гіроскопа виявляється через блокувальний підсилювач на частоті збудження. Налаштування амплітуди рушійного сигналу дозволяє контролювати швидкість коливань маятника. Маятник відкалібрований для обертання швидкості за допомогою гіроскопа ВЕІ (Gyrochip), вихідна напруга якого вимірюється та калібрується за допомогою таблиці показників.



## 1.16. Гіроскоп ВЕІ (Gyrochip)

Гіроскоп ВЕІ встановлений на таблиці показників та оцінюється його

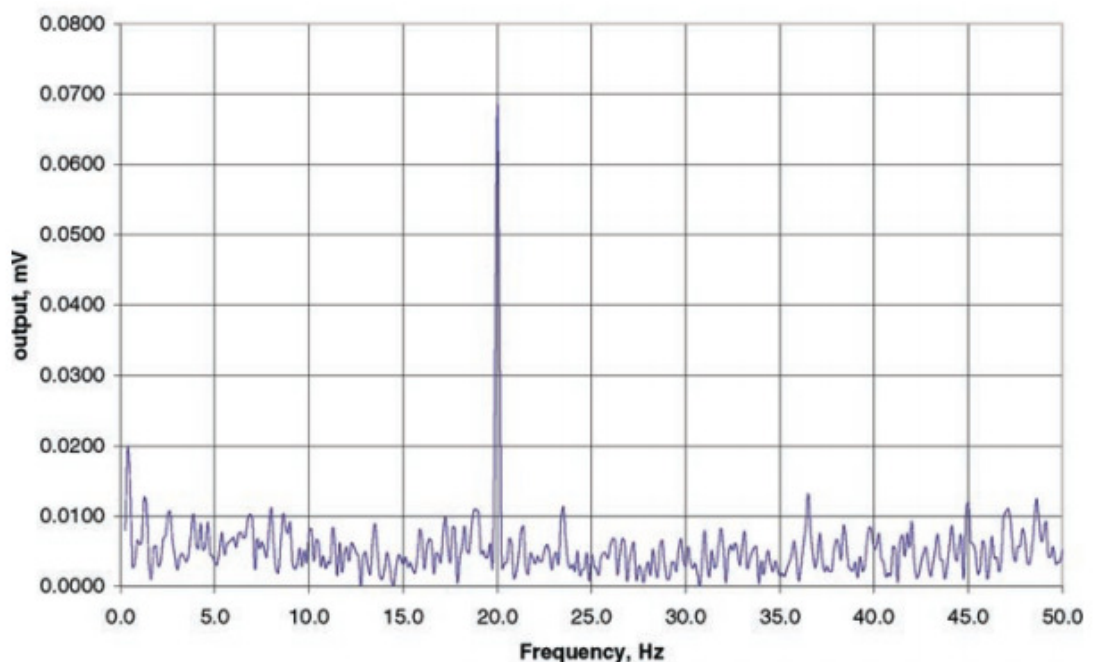


реакція на різні швидкості обертання, як показано на рисунку 1.17.

### Рисунок 1.17. Вимірювання реакції гіроскопа ВЕІ

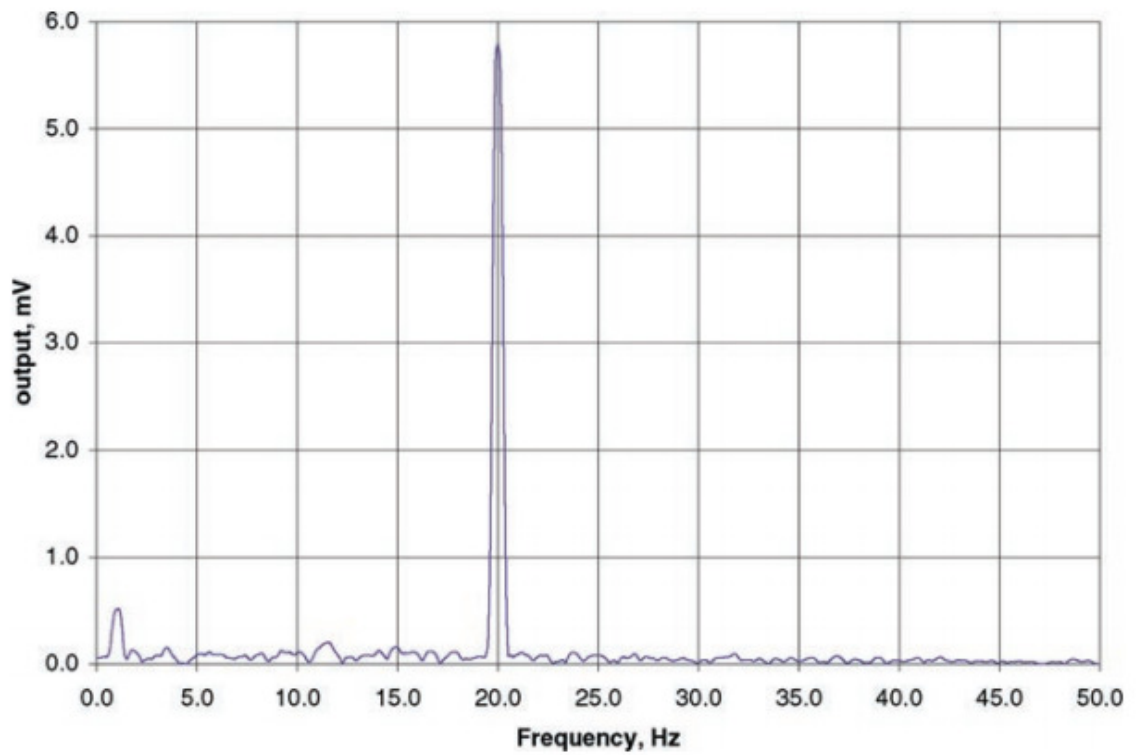
Той самий гіроскоп потім фіксується на геофоні, маятник та його реакція вимірюється для різних частоти збудження геофона. Рівень напруги сигналу збудження змінюється так, що стіл буде коливатися при різних амплітудах, які безпосередньо пов'язані з різними швидкості обертання. На рисунку 1.18 (а) показано виміряну реакцію гіроскоп SAW при збудженні 20 Гц і 3 В для коефіцієнта усереднення 12. Вимірювання проводились з використанням часу усереднення аналізатора сигналу, що дає гарне відношення (сигнал / шум). Реакція гіроскопа ВЕІ вимірюється для тієї ж напруги збудження, яка потім відкалібрується до швидкості обертання з використанням відгуку напруги від швидкості. Від рівня вихідної напруги ВЕІ гіроскопа, видно, що коливання столу при збудженні 3 В становить  $950^{\circ}/\text{год}^{-1}$ . На малюнку 10 показано вихід

гіроскопа SAW та гіроскопа ВЕІ для збудження 20 Гц, 2 В, яке відповідає швидкості обертання  $625^\circ \text{ год}^{-1}$ . Це може бути чітко видно з рисунків 1.18 та 1.19, що напруга збудження геофон безпосередньо перекладається на різні швидкості обертання. Вимірювали реакцію гіроскопа SAW і порівняно з даними з еталонного гіроскопа ВЕІ, щоб перевірити сигнал гіроскопа для різних напруг збудження і відкалібрувати за швидкістю обертання. Рисунок 1.20 показує вимірювану реакцію гіроскопа SAW на різні швидкості обертання. Це початкове вимірювання демонструє життєздатність використання гіроскопа SAW для вимірювання обертання ставки. Тому що на цьому не було зроблено



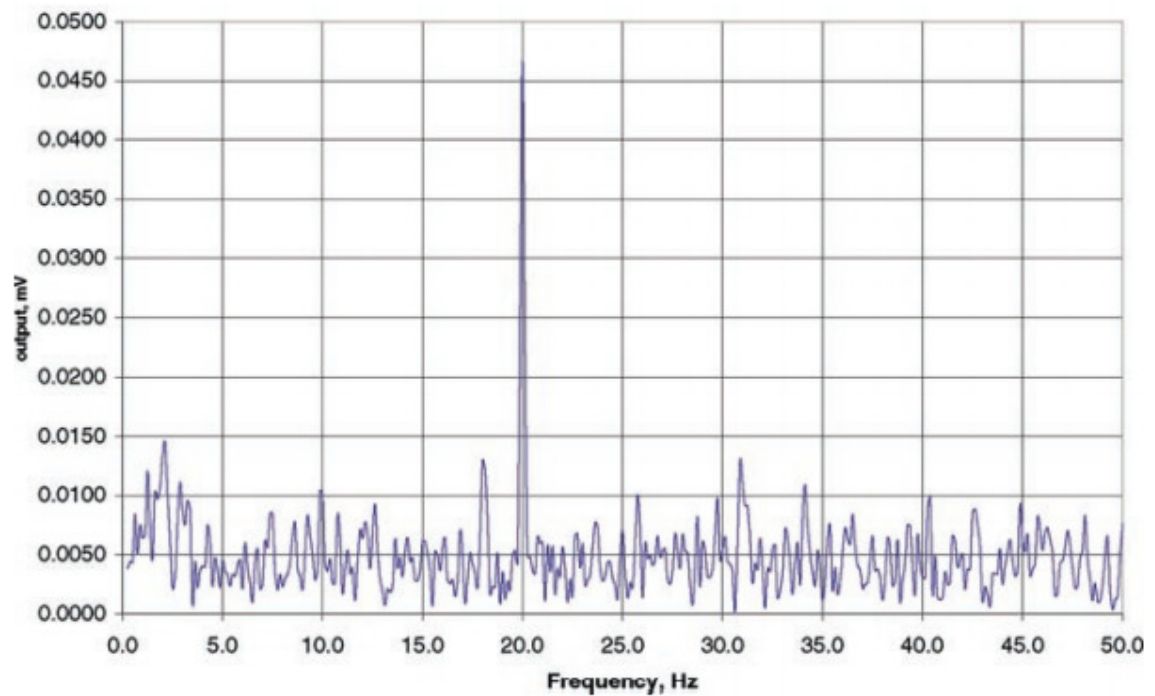
(a)

належної стадії вимірювання, що ускладнюють визначення динамічного діапазону та роздільну здатність. Однак, він повинен мати можливість вимірювати низькі швидкості обертання.

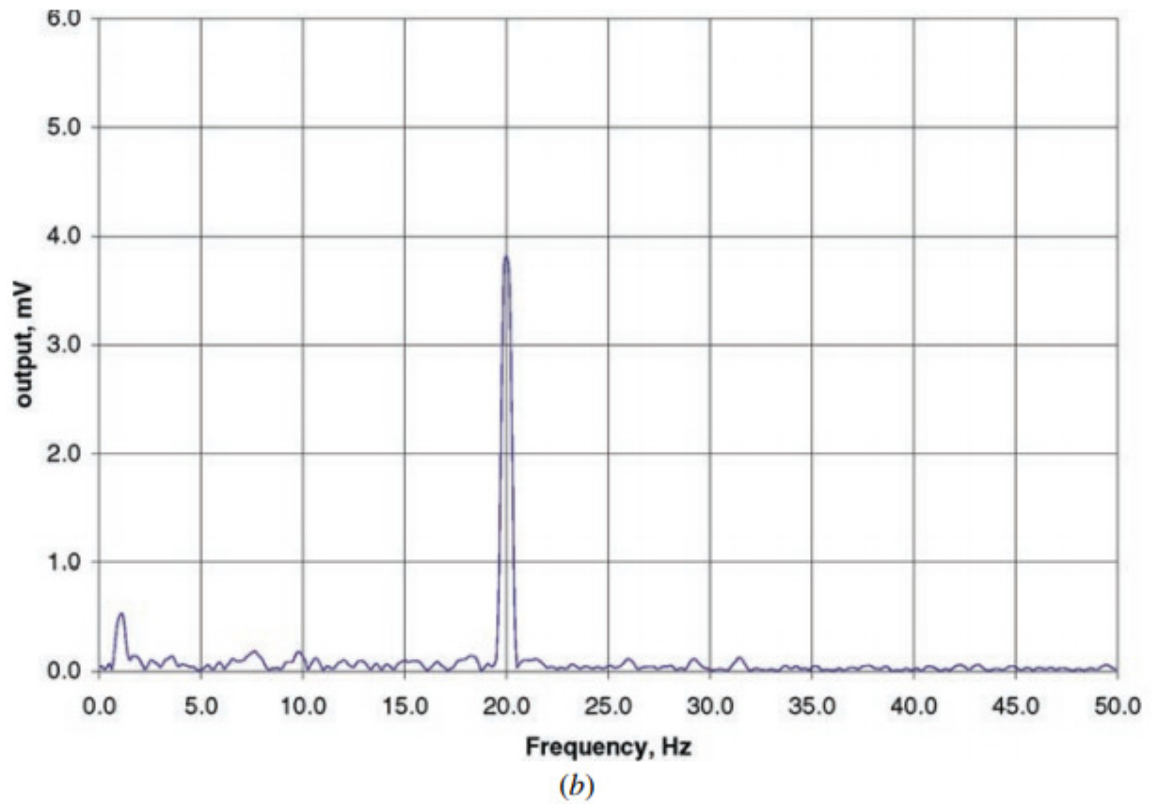


(b)

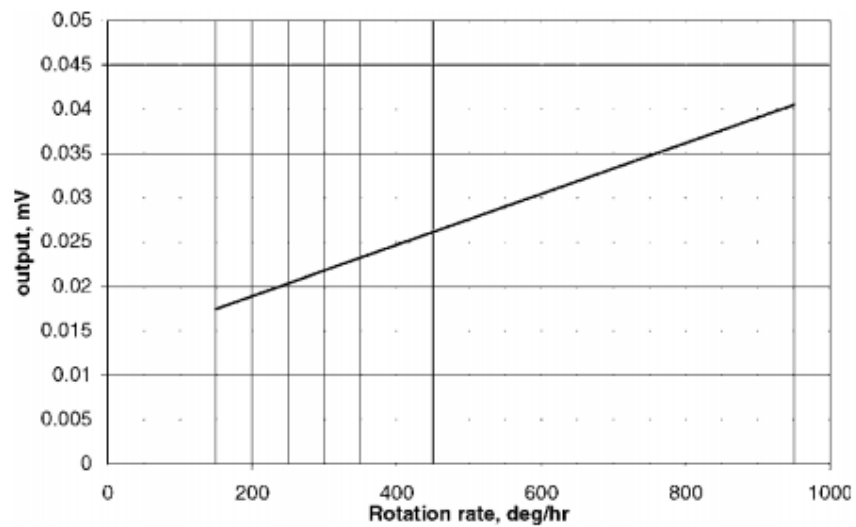
**Рисунок 1.18** Вимірювання реакції гіроскопа SAW на геофон зі збудження 20Гц (а). Вимірювання гіроскопу ВЕІ на 20Гц зі збудженням 3В (b)



(a)



**Рисунок 1.19.** Вимірювання реакції гіроскопа SAW на 20Гц зі збудженням 2В (а). Вимірювання реакції гіроскопа ВЕІ на 20Гц зі збудженням 2В (б).



**Рисунок 1.20.** Реакція гіроскопа SAW на встановлення геофону після калібрування за допомогою гіроскопа ВЕІ

## Висновок

У цій роботі розроблено дизайн, виготовлення та продуктивність оцінки мікрогіроскопа на основі SAWR. Цей гіроскоп має невід'ємну властивість

шорсткість до зовнішніх ударів та вібрацій через відсутність будь-яких підвішених механічних вібраційних елементів. Цей попередній результат вказує на наявність у цього гіроскопа потенціал застосування не тільки для комерційних продуктів, але також у тактичних та інерційних компонентах.

Представлений перший гіроскоп MEMS, розрахований на роботу при високих температурах  $175^{\circ}\text{C}$  - ADXRS645. Цей датчик забезпечує точність вимірювання кутової швидкості в суворих умовах, відкидаючи вплив удару та вібрації. Гіроскоп підтримується високотемпературних ІС для отримання сигналу для обробки.

Це високочастотна операція забезпечує високу роздільну здатність. Однак,

акустичне послаблення на високих частотах слід мінімізувати і шум слід зменшувати завдяки правильній конструкції, екранування та упаковка.

Гіроскоп MEMS – невеликі розміри функцій. Це особливо важливо для продуктивності коли розміри ознак наближаються до  $1\ \mu\text{m}$  для більш високочастотних пристроїв. Гіроскоп SAW, заснований на представленій концепції, поєднаний з попередньою роботою над бездротовим датчиком деформації. На сьогоднішній день гіроскоп  $400\ \text{MHz}$  успішно працює, і гіроскоп  $915\ \text{MHz}$  був виготовлений для інтеграції з антенною системою для бездротові програми.

### Список використаної літератури

1. Джуно Т та Пізано О.П., 1996, Мікромеханізований подвійний вхідний датчик кутової швидкості осі. с. 299–302
2. Кемпбелл Д. Д. та Джонс В. Р. 1968, Метод оцінки оптимальні зрізи кристалів та напрямки поширення для збудження п'єзоелектричних поверхневих хвиль ІЕЕЕ. С. 15–17
3. Патти М. П. та Наджіфі К. 1994, Мікрообробне віброкільце, с . 213–220
4. Джефф В. <https://www.analog.com/en/technical-articles/mems-gyroscope-provides-precision-inertial-sensing.html>

## Розділ 2. Моделі похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнта

Інерційна навігація – це самостійна навігаційна техніка, при якій проводять вимірювання акселерометрами та гіроскопами, що використовуються для відстеження положення та орієнтації об’єкта щодо відомого пуску

точка, орієнтація та швидкість. Інерційні одиниці вимірювання (ІОВ), як правило, містять три ортогональні швидкісні гіроскопи та три ортогональні акселерометри, що вимірюють кутову швидкість та лінійне прискорення. Обробляючи сигнали цих пристроїв, можна відстежувати положення та орієнтацію пристрою, як описано в розділі 2.1.

Інерційна навігація використовується в широкому діапазоні застосувань, включаючи навігацію літаків, тактичні та стратегічні ракети, космічні кораблі, підводні човни та кораблі. Останні досягнення в конструюванні MEMS дозволили виготовляти невеликі та легкі інерційні системи навігації. Ці досягнення розширили спектр можливих застосувань, включивши такі сфери, як рух людей та тварин.

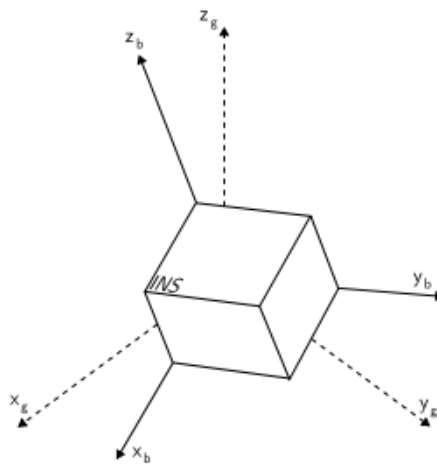


Рисунок 2.1. Основа глобальної системи відліку

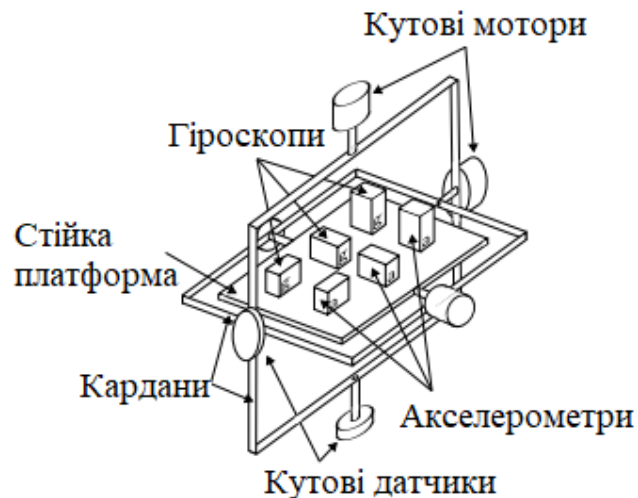
<b>Кафедра АКСУ</b>				<b>НАУ 19 16 77 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	Суховаров Є.О.			<b>Моделі похибок зміщення нуля та масштабного коефіцієнта</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
<b>Керівник</b>	Чиковані Р.Р.					39	150
<b>Консульт.</b>	Чиковані В.В.				<b>602 6.050201</b> Error! Unknown switch argument.		
<b>Н. контр.</b>	Чиковані В.В.						
<b>Зав. каф.</b>	Тачиніна О.М.						



## 2.1. Інерційні конфігурації системи

Майже всі ІОВ належать до однієї з двох категорій. Різниця між двома категоріями, що полягає в системі відліку, з якими працюють гіроскопи та акселерометри. Протягом усього спостереження, ми будемо посилалися на систему відліку навігаційної системи, як основу нашої глобальної конструкції, як показано на рисунку 2.1.

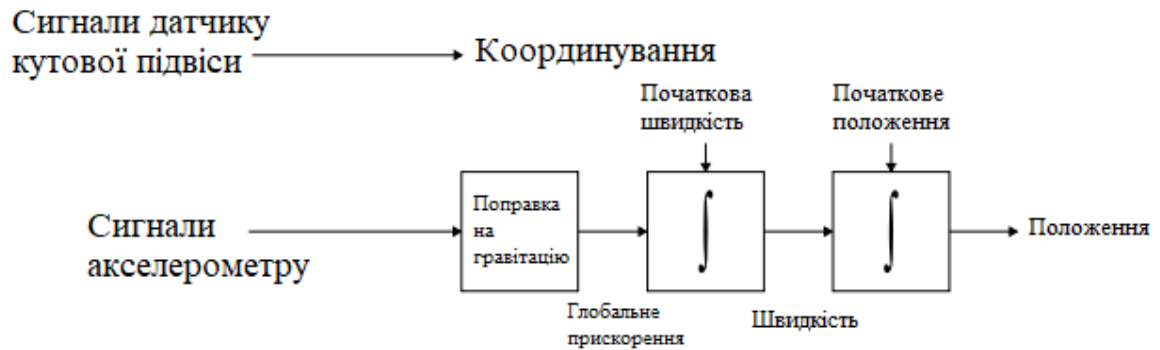
У системах стабільного типу, інерційні датчики встановлюються на платформі, яка ізолювана від будь-якого зовнішнього обертального руху. Іншими словами, платформа тримається на рівні з глобальною конструкцією. Це досягається кріпленням платформи за допомогою карданних каркасів, які забезпечують свободу платформи по всіх трьох осях, як показано на рисунку 2.2.



**Рисунок 2.2.** Стійка платформа ІОВ

Гіроскопи, встановлені на платформі, виявляють будь-які обертання. Ці сигнали направляються до динамометричних двигунів (моторів), які обертають карданний вал, щоб скасувати такі обертання, необхідно вирівнювати платформу відносно до конструкції. Для відстеження орієнтації пристрою, кути між сусідніми карданними підвісами, можна зчитувати за допомогою кутових

відсіків. Для обчислення положення пристрою, сигнали з платформних акселерометрів подвійно інтегруються. Зверніть увагу, що з вертикалі необхідно відняти прискорення через гравітацію каналу перед виконанням інтеграції. Алгоритм стабільної інерційної навігації платформи показаний на рисунку 2.3.



**Рисунок 2.3.** Алгоритм стабільної інерційної навігації

В безплатформенних інерційних системах датчики жорстко встановлюються на пристрій та вихідні величини вимірюються в основній конструкції (тілі конструкції), а не в глобальній. Для відстеження положення трьох сигналів акселерометра, які розбиваються на координати за допомогою яких визначається інтеграція гіроскопічних сигналів. Потім сигнали прискорення інтегруються. Ця процедура показана на рисунку 2.4.

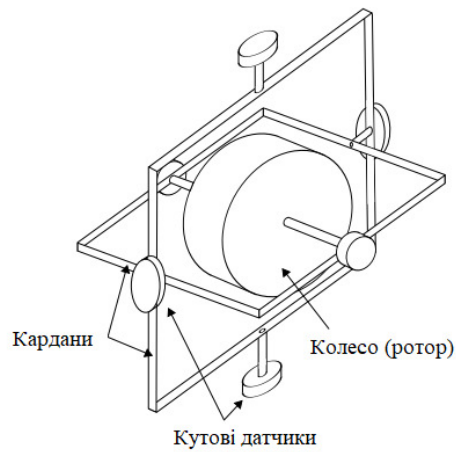


**Рисунок 2.4.** Бесплатформенний інерційний навігаційний алгоритм

Стабільна платформа та системи стримування засновані на одних і тих же основних принципах. Системи вивільнення зменшили механічну складність і, як правило, фізично менші, ніж стабільні платформні системи. Ці переваги досягаються ціною збільшення обчислювальної складності. Оскільки вартість обчислень зменшилась, системи перетворення стали головним типом INS.

## 2.2. Гіроскопи

Звичайний гіроскоп складається із прядки, що встановлений на двох карданних підвісках, які дозволяють йому обертатися по всіх трьох осях, як показано на рисунку 2.5 (а, б). Ефектом збереження моменту імпульсу є те, що прядка протистоїть змінам положення. Отже, коли механічний гіроскоп піддається обертанню, колесо залишатиметься в постійному положенні, а кути між сусідніми карданними валами змінюватимуться. Для вимірювання положення, кути між сусідніми карданами можуть бути зчитані за допомогою кутових відсіків. Зверніть увагу, що звичайний гіроскоп вимірює положення. На відміну від цього, майже всі сучасні гіроскопи (включаючи оптичні та типи MEMS) є гіроскопами, що вимірюють кутову швидкість. Основним недоліком механічних гіроскопів є те, що вони містять рухомі частини. Рухомі деталі спричиняють тертя, яке в свою чергу з часом виводить пристрій з ладу. Для мінімізації тертя використовуються високоточні підшипники та спеціальні мастильні матеріали, що збільшує час роботи пристрою. Механічним гіроскопам також потрібно кілька хвилин для прогріву, що не ідеально у багатьох ситуаціях.



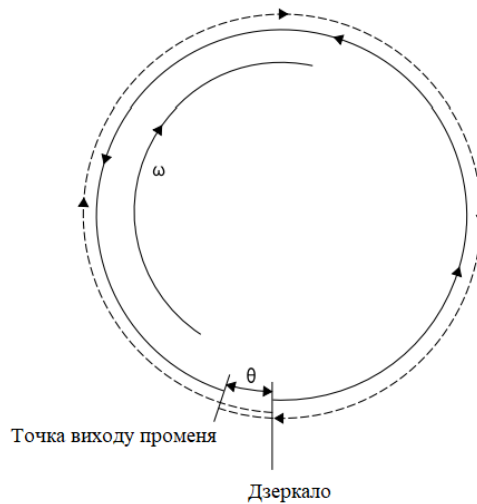
**Рисунок 2.5 (а).** Звичайний механічний гіроскоп



**Рисунок 2.5 (б).** Гіроскоп в дії

Волоконно–оптичний гіроскоп (ВОГ) використовує інтерференцію світла для вимірювання кутової швидкості. ВОГ складається з великої котушки оптичного волокна. Для вимірювання обертання котушки, в протилежних напрямках спрацьовують два промені світла. Якщо датчик зазнає обертання, тоді промінь, що рухається у напрямку обертання, відчуватиме довший шлях до іншого кінця волокна, ніж промінь, що рухається проти обертання, як показано на малюнку 6. Відомий як ефект Саньяка. Коли промені виходять з волокна, вони поєднуються. Фазовий зсув, введений внаслідок ефекту Саньяка, призводить до того, що пучки заважають, в результаті чого створюється комбінований пучок інтенсивності від якого залежить кутова швидкість. Отже,

можна виміряти кутову швидкість, вимірюючи інтенсивність комбінованого пучка.



**Рисунок 2.6.** Ефект Саньяка

Кільцеві лазерні гіроскопи (КЛГ) також засновані на ефекті Саньяка. Різниця між ВОГ та КЛГ полягає в тому, що в КЛГ лазерні промені спрямовані навколо замкнутого шляху із використанням оптичних дзеркал. На рисунку 2.6. **пунктирна лінія** – це шлях, пройдений променем, що рухається у напрямку обертання. **Суцільна лінія** – це промінь, що рухається проти обертання.  $\theta$  – кут, на який гіроскоп повертається, поки промені перебувають у польоті.

На відміну від механічних гіроскопів, оптичні гіроскопи не містять рухомих частин і для запуску їм потрібно лише кілька секунд. Точність оптичного гіроскопа багато в чому залежить від довжини шляху пропускання світла (чим більше, тим краще), що обмежується розмірами пристрою.

Незважаючи на роки розробки, механічні та оптичні гіроскопи все ще мають велику кількість вимоги до деталей з високою пропускнуою точністю та складних методів складання. На відміну від датчиків МЕМС, побудованих з використанням кремнієвих технологій мікрообробки, кількість малих деталей невелика (гіроскоп МЕМС може складатися з трьох частин) і порівняно дешевий у виробництві.

Гіроскопи MEMS використовують ефект Кориоліза, який стверджує, що в системі відліку, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , маса  $m$ , що рухається зі швидкістю  $v$ , що сила:

$$F_c = -2m(\omega * v) \quad (2.1)$$

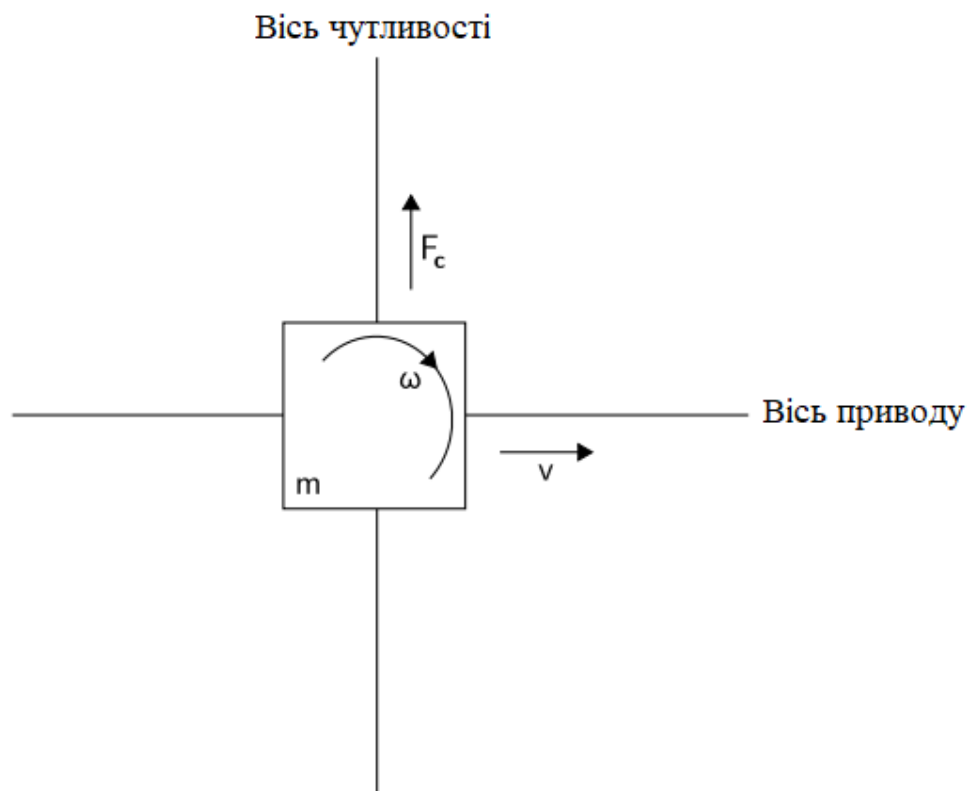
Гіроскопи MEMS містять віброуючі елементи для вимірювання ефекту Кориоліза. Існує багато геометрій вібраційних елементів, таких як віброколесо та гіроскопи камертона. Найпростіша геометрія складається з однієї маси, яка приводить вібрацію вздовж ведучої осі, як показано на рисунку 2.7. Коли обертається гіроскоп, вторинна вібрація індукується вздовж перпендикулярної осі через силу Кориоліза. Кутову швидкість можна обчислити, вимірявши це вторинне обертання. В даний час датчики MEMS не можуть відповідати точності оптичних приладів, проте, як очікується, вони будуть робити це в майбутньому.

Нижче наведено перелік вигідних властивостей датчиків MEMS, а саме:

- малий розмір;
- невелика вага;
- міцна конструкція;
- низьке споживання енергії;
- короткий час запуску;
- недорогий у виробництві (у великих обсягах);
- висока надійність;
- низькі експлуатаційні витрати;
- сумісний з операціями у інших середовищах;

**Таблиця 1.** Технічні характеристики гіроскопів Honeywell GG1320AN та GG5300

	<b>GG1320AN</b> (Лазерний гіроскоп)	<b>GG5300</b> (MEMC тривісний гіроскоп)
<b>Розмір</b>	88 мм x 88 мм x 45 мм	50 мм x 50 мм x 30 мм
<b>Вага</b>	454 гр.	136 гр.
<b>Час запуску</b>	< 4 сек	< 1 сек
<b>Потужність</b>	15 V 1.6 Вт / 5 V 0.375 Вт	5 V < 800 мА
<b>Температурний діапазон</b>	Від – 54 °С до + 85 °С	Від – 45 °С до 85 °С
<b>Випадкове блукання</b>	$\frac{0.0035^\circ}{\sqrt{\text{год}}}$	$\frac{0.2^\circ}{\sqrt{\text{год}}}$
<b>Похибка зміщення</b>	$\frac{0.0035^\circ}{\text{год}}$	$< \frac{70^\circ}{\text{год}}$



**Рисунок 2.7.** Вібримасовий гіроскоп

Як вже згадувалося раніше, основним недоліком гіроскопів MEMS є те, що в даний час вони набагато менш точні, ніж оптичні прилади. Таблиця 1

ілюструє переваги та недоліки технології MEMS шляхом порівняння специфікацій двох гіроскопів, виготовлених компанією **Honeywell**. **GG1320AN** – це одновісний цифровий лазерний гіроскоп. **GG5300** – це тривісний гіроскоп зі швидкістю MEMS. Зауважте, що пакет MEMS не тільки містить три гіроскопи, на відміну від одного, але також має нижче споживання енергії, коротший час запуску, а також менший і легший оптичний пристрій. Основним недоліком MEMS є те, що він набагато менш точний, на що вказують похибка зміщення та вимірювання випадкових блукань. Ці типи вимірювань пояснюються в розділі 2.3.

## **2.3. Характеристики похибок гіроскопа MEMS**

### **2.3.1. Постійне зміщення**

Зміщення швидкості гіроскопа – це середній вихід гіроскопа, коли він не зазнає жодного обертання (тобто зміщення результату від справжнього значення), в ° / год. Постійна похибка зміщення –  $\varphi$ , інтегруючись, спричиняє кутову похибку, яка лінійно зростає з часом  $\theta(t) = \varphi \cdot t$ .

Постійну похибку зміщення швидкості гіроскопа можна оцінити, взявши довготривале середнє значення вихідної сили гіроскопа, хоча він не зазнає жодного обертання. Як тільки зміщення відоме, його тривіальність компенсується простим відніманням, зміщення від отриманого результату.

### **2.3.2 Термомеханічний білий шум / Кут випадкового блукання**

Вихід гіроскопа MEMS буде порушений деяким термомеханічним шумом, який коливається зі швидкістю, набагато більшою, ніж частота дискретизації датчика. В результаті зразки, отримані від датчика, збурюються послідовністю білого шуму, яка є просто послідовністю нульових середніх



некорельованих випадкових величин. У цьому випадку, кожна випадкова величина однаково розподілена і має кінцеву дисперсію  $\sigma^2$ .

Щоб побачити, як цей шум впливає на інтегрований сигнал, ми можемо зробити простий аналіз, в якому передбачається, що для виконання інтегрування використовується правило прямокутника. Нехай  $N_i$  –  $i$ -а випадкова величина у послідовності білого шуму. Кожна  $N_i$  однаково розподілена із середнім значенням  $E(N_i) = E(N) = 0$  та кінцевою дисперсією  $Var(N_i) = Var(N) = \sigma^2$ . За визначенням послідовності  $Cov(N_i, N_j) = 0$ , для всіх  $i \neq j$ . Результат використання правила прямокутника для інтегрування сигналу

білого шуму  $q(t)$  протягом проміжку часу  $t = n \cdot \delta t$  дорівнює:

$$\int_0^t q(t)dt = \delta t \sum_{i=1}^n N_i \quad (2.2)$$

де  $n$  – кількість зразків, отриманих від пристрою протягом періоду, а  $\delta t$  – час між послідовними зразками. Використовуючи стандартні формули  $E(aX + bY) = aE(X) + bE(y)$  та  $Var(aX + bY) = a$

$2Var(X) + b^2 Var(Y) + 2abCov(X, Y)$  (де  $a$  і  $b$  – константи, а  $X$  і  $Y$  – випадкові величини), що впливає:

$$E\left(\int_0^t q(t)dt\right) = \delta t * n * E(N) = 0 \quad (2.3)$$

$$Var\left(\int_0^t q(t)dt\right) = \delta t * n * Var(N) = \delta t * t * \sigma^2 \quad (2.4)$$

Отже, шум вносить в інтегрований сигнал нульової середньої похибки випадкового блукання, стандартне відхилення, при якій зростає час пропорційно квадратному кореню:

$$\sigma_{\theta}(t) = \sigma * \sqrt{\delta t * t} \quad (2.5)$$

Оскільки нас зазвичай цікавить, як шум впливає на інтегрований сигнал, виробники зазвичай визначають шум за допомогою вимірювання кута випадкового блукання (КВБ) з одиницями вимірювань  $\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{год}}}$ :

$$\text{КВБ} = \sigma_{\theta} \quad (2.6)$$

Наприклад, Honeywell GG5300 має показник КВБ  $\frac{0,2^{\circ}}{\sqrt{\text{год}}}$ . Це означає, що через 1 годину стандартне відхилення похибки буде  $0,2^{\circ}$ , через 2 години –  $\sqrt{2} * 0,2 = 0,28^{\circ}$ . Інші вимірювання, що використовуються для визначення шуму, – це спектральна щільність  $\left(\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{год}}}\right)^2$  і щільність шуму ШПФ  $\left(\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{Гц}}}\right)$ . Можна перетворити між різними характеристиками шуму, використовуючи рівняння:

$$\text{КВБ} \left(\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{год}}}\right) = \frac{1}{60} * \sqrt{\text{Щ} \left(\frac{\left(\frac{\text{град}}{\text{год}}\right)^2}{\text{Гц}}\right)} \quad (2.7)$$

$$\text{КВБ} \left(\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{год}}}\right) = \frac{1}{60} * \text{ШПФ} \left(\frac{\text{град}}{\sqrt{\text{Гц}}}\right) \quad (2.8)$$

### 2.3.3. Мерехтливий шум / Стабільність зміщення

Зміщення гіроскопа MEMS з часом блукає через шум мерехтіння в електроніці та інших компонентах, сприйнятливих до випадкового мерехтіння. Мерехтливий шум – це шум із спектром  $\frac{1}{f}$ , ефекти якого зазвичай спостерігаються на низьких частотах в електронних компонентах. На високих частотах мерехтливий шум, як правило, затьмарюється білим шумом.

Коливання зміщення, що виникають через мерехтіння, зазвичай моделюються як випадкове блукання.

Вимірювання зміщення стабільності описує, як зміщення пристрою може змінюватися протягом певного періоду часу, як правило, близько 100 секунд, у фіксованих умовах (зазвичай, включаючи постійну температуру). Стабільність зміщення зазвичай визначається як значення  $1\sigma$  з одиницями виміру  $\frac{\text{град}}{\text{год}}$  або  $\frac{\text{град}}{\text{сек}}$  для менш точних пристроїв. Під моделлю випадкового блукання стабільність зміщення можна інтерпретувати наступним чином; Якщо  $V_t$  – відоме зміщення в момент часу  $t$ , то  $1\sigma$  стабільність зміщення  $\frac{0,01^\circ}{\text{год}}$  протягом 100 секунд означає, що зміщення в момент часу  $(t + 100)$  секунд є випадковою величиною з очікуваним значенням  $V_t$  і стандартним відхиленням  $\frac{0,01^\circ}{\text{год}}$ . З часом ця властивість створює випадкове блукання в зміщенні гіроскопа, стандартне відхилення якого зростає пропорційно квадратному кореню від часу. З цієї причини стабільність зміщення від часу визначається вимірюванням зміщенням випадкового блукання де  $t$  – проміжок часу, для якого визначається стабільність зміщення:

$$\text{ЗВБ} \left( \frac{\text{град}}{\sqrt{\text{ГОД}}} \right) = \frac{СЗ \left( \frac{\text{град}}{\text{ГОД}} \right)}{\sqrt{t} \text{ (ГОД)}} \quad (2.9)$$

Як зазвичай, нас цікавить, як ця помилка впливає на орієнтацію, отриману в результаті інтегрування швидкості сигналу гіроскопа. Якщо ми припустимо модель випадкового блукання зі зміщенням, то результатом інтегрування коливань зміщення є випадкове блукання другого порядку за кутом. Насправді коливання зміщеності насправді не поведуться як випадкове блукання. Якби вони це зробили, то невизначеність у зміщенні пристрою зростала без обмежень із збільшенням періоду часу. На практиці зміщення обмежується, щоб бути в межах певного діапазону, і тому модель випадкового

блукання є лише хорошим наближенням до справжнього процесу протягом коротких періодів часу.

### **2.3.4 Температурний вплив**

Коливання температури внаслідок змін у навколишньому середовищі та самонагрівання датчика викликають рух у зміщенні. Зверніть увагу, що такі рухи не враховуються у вимірах стабільності зміщення, які проводяться у фіксованих умовах. Будь-яке залишкове усунення, спричинене зміною температури, призведе до помилки в координації, яка зростає лінійно з часом. Зв'язок між зміщенням та температурою часто є дуже нелінійною для датчиків МЕМС. Більшість інерційних одиниць вимірювання (ІОВ) містять внутрішні датчики температури, які дозволяють виправити вплив температурного зміщення. Деякі ІОВ, такі як Xsens Mtx, виконують такі виправлення внутрішньо.

### **2.3.5 Похибки калібрування**

Термін "похибки калібрування" в сукупності позначають похибки в масштабних коефіцієнтах, вирівнюванні та лінійності гіроскопів. Такі похибки, як правило, створюють похибки зміщення, які спостерігаються лише під час повороту (обертання) пристрою. Такі похибки призводять до накопичення додаткового дрейфу в інтегрованому сигналі, величина якого пропорційна швидкості та тривалості рухів. Зазвичай можна виміряти та виправити похибки калібрування. Деякі нові ІОВ, такі як Xsens Mtx, застосовують внутрішні виправлення похибок калібрування.

### **2.3.6 Підсумок**

Основні джерела похибок, викладені в цьому розділі, та узагальнені в таблиці 2. Відносна важливість кожного джерела похибок у різних гіроскопах різниться. Для гіроскопів МЕМС похибки випадкового блукання (шуму) та некореговані похибки зміщення, спричинені некомпенсованими коливаннями температури, або похибка в початковій оцінці зміщення, як правило, є найбільш

важливими джерелами похибок. Кутове випадкове блукання, може бути використане, як нижня межа невизначеності координації, отриманої в результаті інтегрування швидкості сигналу гіроскопа.

**Таблиця 2.** Короткий зміст джерел гіроскопічних похибок

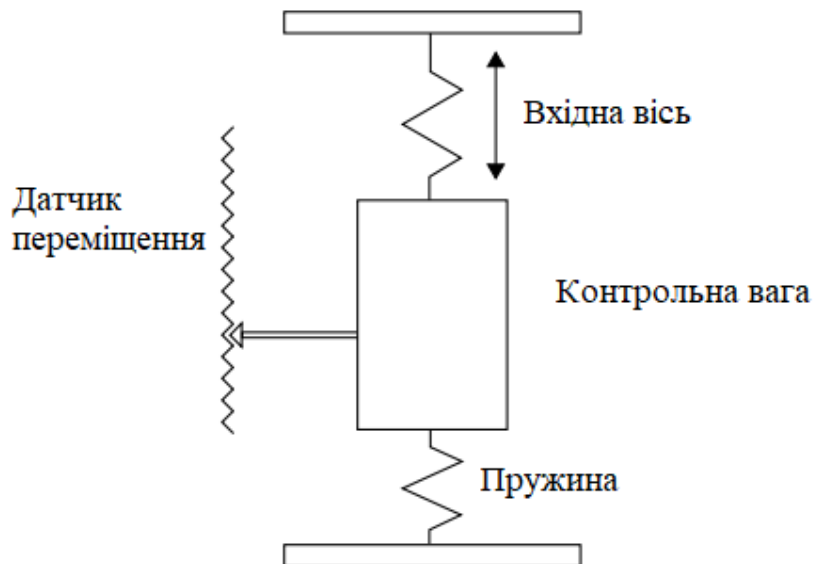
Вид похибки	Опис	Результат інтеграції
Зміщення	Постійне зміщення $\varphi$	Постійна зростаюча кутова похибка $\theta(t) = \varphi \cdot t$
Білий шум	Шум зі стандартним кутом випадкового відхилення $\sigma$	Кут випадкового блукання, стандартне відхилення зростає з квадратним коренем часу
Температурний ефект	Залежно від температурного зміщення	Будь-яке зміщення інтегрується в координації, викликаючи похибку координації, яка з часом зростає
Калібрування	Детерміновані похибки в масштабних коефіцієнтах вирівнювання та лінійності гіроскопів	Дрейф орієнтації пропорційний швидкості та тривалості руху
Зміщення нестабільності	Коливання зміщення, як правило, моделюються як випадкове блукання із зміщенням	Випадкове блукання другого порядку

## 2.4. Лінійні акселерометри

### 2.4.1 Види акселерометрів (Механічний)

Механічний акселерометр складається з маси, підвішеної пружинами, як показано на рисунку 2.8. Зміщення маси вимірюється за допомогою відбору переміщення, подаючи сигнал, пропорційний силі  $F$ , що діє на масу в напрямку

вхідної осі. Для обчислення прискорення, що діє на пристрій, використовується другий закон Ньютона  $F = ma$ .

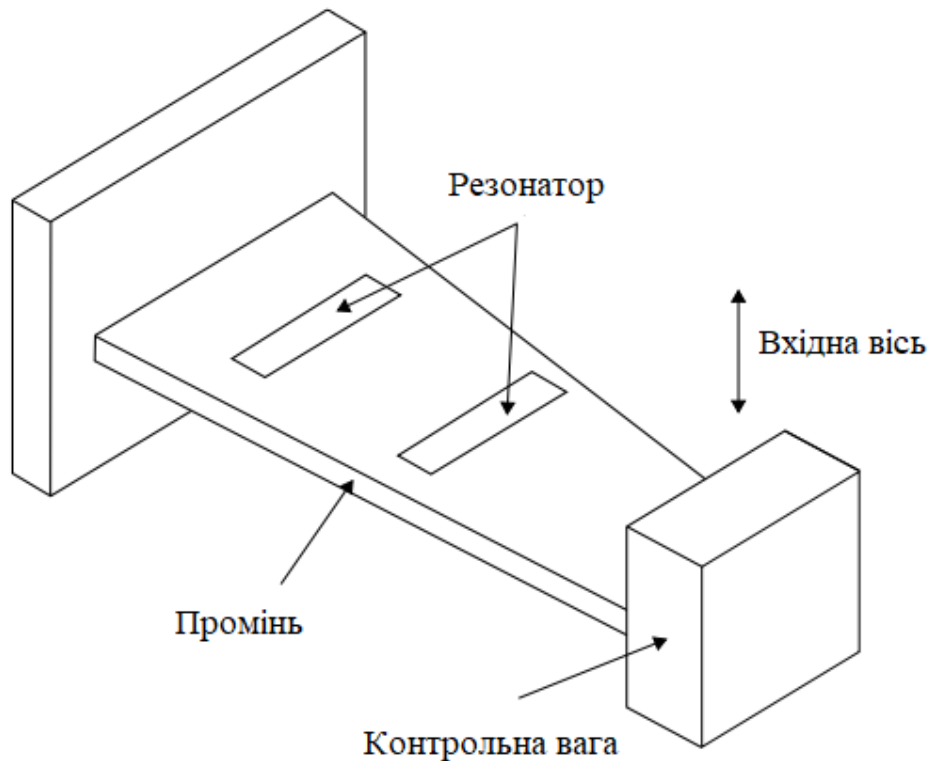


**Рисунок 2.8.** Механічний акселерометр

#### 2.4.2 Види акселерометрів (Твердотілий)

Твердотільні акселерометри можна розділити на різні підгрупи, включаючи поверхневі акустичні хвилі, вібраційні, кремнієві та кварцові пристрої. Твердотільні акселерометри малі, надійні та міцні.

Прикладом твердотільного акселерометра є акселерометр поверхневої акустичної хвилі (SAW). Акселерометр SAW складаються з консольного пучка, який резонує з певною частотою, як показано на рисунку 2.9. Маса прикріплена до одного кінця променя, який вільно рухається. Інший кінець жорстко прикріплений до корпусу. Коли застосовується прискорення вздовж вхідної осі, промінь згинається. Це призводить до того, що частота поверхневої акустичної хвилі змінюється пропорційно прикладеній деформації. Вимірюючи цю зміну частоти, можна визначити прискорення.



**Рисунок 2.9.** Акселерометр поверхневої акустичної хвилі (SAW)

### 2.4.3. Акселерометри МЕМС

Кремнієві акселерометри з мікрообробкою використовують ті самі принципи, що і механічні та твердотільні датчики. Існує два основних класи акселерометра МЕМС. Перший клас складається з механічних акселерометрів (тобто: приладів, які вимірюють зміщення підтримуваної маси), виготовлених із використанням методів МЕМС. Другий клас складається з пристроїв, які вимірюють зміну частоти вібраційного елемента, спричинену зміною натягу, як у акселерометрах SAW.

Переваги їх, що вони невеликі, легкі, мають низьке енергоспоживання та менший час запуску. Їх головним недоліком є те, що в даний час вони не настільки точні, як акселерометри, виготовлені з використанням традиційних методів, хоча продуктивність пристроїв МЕМС швидко покращується.

## 2.5 Характеристики похибок акселерометра МЕМС

Зміщення акселерометра – це набір вихідного сигналу від справжнього значення,  $\frac{m}{c^2}$ . Постійна похибка зміщення  $\varrho$ , при подвійному інтегруванні викликає похибку в положенні, яка з часом зростає квадратично. Накопичена похибка в положенні становить:

$$s(t) = \varrho * \frac{t^2}{2} \quad (2.10)$$

де  $t$  – час інтеграції.

Можна оцінити зміщення, вимірюючи довгострокове середнє значення потужності акселерометра, коли він не зазнає жодного прискорення. На жаль, це ускладнюється гравітацією, оскільки компонент гравітації, що діє на акселерометр, буде виглядати як зміщення. Тому необхідно знати точну орієнтацію пристрою щодо гравітаційного поля, щоб виміряти зміщення. На практиці цього можна досягти за допомогою процедур калібрування, при яких пристрій встановлюється на вертушку, орієнтація якої може контролюватися надзвичайно точно.

### 2.5.1 Термомеханічний білий шум / швидкість випадкового блукання

Вихідні зразки, отримані з акселерометра МЕМС, порушені послідовністю білого шуму.

У розділі 2.3.2 ми показали, що інтегрування білого шуму виробляє випадкове блукання, стандартне відхилення якої зростає пропорційно  $\sqrt{t}$ .

Звідси білий шум на виході акселерометра створює випадкову швидкість блукання, зазвичай задану в одиницях  $\frac{m}{c \sqrt{год}}$ . Щоб побачити, який вплив має акселерометр білого шуму на розраховане положення, ми можемо зробити подібний аналіз, в якому подвійно інтегруємо зразки, отримані з акселерометра.



$N_i$ , де  $i$ -а випадкова величина в послідовності білого шуму, з  $E(N_i) = E(N) = 0$  та  $\text{Var}(N_i) = \text{Var}(N) = \sigma^2$ . Результатом подвійного інтегрування сигналу білого шуму  $q(t)$  протягом проміжку часу  $t = n \cdot \delta t$ , це

$$\int_0^t \int_0^t q(t) dt dt = \delta t \sum_{i=1}^n \delta t \sum_{j=1}^i N_j = \delta t^2 \sum_{i=1}^n (n - i + 1) N_i \quad (2.11)$$

де  $n$  – кількість зразків, отриманих від пристрою протягом періоду, а  $\delta t$  – час між послідовними зразками. Очікувана похибка в положенні:

$$E\left(\int_0^t \int_0^t q(t) dt dt\right) = \delta t^2 \sum_{i=1}^n (n - i + 1) E(N_i) = 0 \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}\left(\int_0^t \int_0^t q(t) dt dt\right) &= \delta t^4 \sum_{i=1}^n (n - i + 1)^2 \text{Var}(N_i) \\ &= \frac{\delta t^4 n(n + 1)(2n + 1)}{6} \text{Var}(N) \approx \frac{1}{3} \delta t * t^3 * \sigma^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

де апроксимація передбачає, що  $\delta t$  мала (тобто, що частота дискретизації велика, що є справедливим припущенням для сучасних акселерометрів МЕМС). Цей аналіз показує, що білий шум акселерометра створює випадкове блукання другого порядку в положенні з нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням, яке зростає пропорційно  $t^{\frac{3}{2}}$ .

$$\sigma_s(t) \approx \sigma * t^{\frac{3}{2}} * \sqrt{\frac{\delta t}{3}} \quad (2.14)$$

## 2.5.2 Мерехтливий шум / Стабільність зміщення

Акселерометри МЕМС схильні до все більшого шуму, що змушує зміщення з часом блукати. Такі коливання, як правило, моделюються як випадкове блукання зі зміщенням. Використовуючи цю модель, мерехтливого шуму, що створює випадкове блукання другого порядку за швидкістю, невизначеність якої зростає пропорційно  $t^{\frac{3}{2}}$ , та випадкове блукання третього порядку в положенні, яке зростає пропорційно  $t^{\frac{5}{2}}$ .

### **2.5.3 Температурний вплив**

Як і у випадку з гіроскопами, зміна температури спричиняє коливання зміщення вихідного сигналу. Взаємозв'язок між зміщенням та температурою залежить від конкретного пристрою, однак він часто є дуже нелінійним. Будь-яке залишкове упередження спричиняє похибку в положенні, яке з часом зростає квадратично. Якщо ІОВ містить датчик температури, тоді можна застосовувати корекції до вихідних сигналів для компенсації ефектів, що залежать від температури.

### **2.5.4 Похибки калібрування**

Похибки калібрування (похибки в масштабних коефіцієнтах, вирівнювання та лінійність вихідних даних) виглядають як похибки зміщення, які видно лише під час прискорення пристрою. Зверніть увагу, що ці "тимчасові похибки" зміщення можуть спостерігатися навіть тоді, коли пристрій нерухомий через гравітаційне прискорення.

### **2.5.5. Підсумок**

Основні джерела похибок для акселерометрів МЕМС подібні до похибок для гіроскопів. У таблиці 3 узагальнені джерела похибок, представлені в цьому розділі. Для пристроїв МЕМС кутові випадкові блукання та некореговані похибки, як правило, є джерелами похибок, які обмежують продуктивність пристрою, проте відносна важливість кожного джерела похибок залежить від конкретного пристрою, що використовується.

**Таблиця 3.** Короткий опис похибок акселерометра

Вид похибки	Опис	Результат інтеграції
Зміщення	Постійне зміщення $\rho$ у вихідному сигналі акселерометрів	Квадратично зростаюча похибка $s(t) = \rho * \frac{t^2}{2}$
Білий шум	Шум з деяким стандартним відхиленням $\sigma$	Випадкове блукання другого порядку. Стандартне відхилення похибки положення зростає із збільшенням $\sigma_s(t) = \sigma * t^{\frac{3}{2}} * \sqrt{\frac{\delta t}{3}}$
Температурний ефект	Залежно від температурного зміщення	Будь-яке зміщення спричиняє похибку в положенні, яке з часом зростає квадратично
Калібрування	Детерміновані похибки в масштабних коефіцієнтах, вирівнюванні та лінійності акселерометра	Дрейф пропорційна квадрату швидкості і тривалості прискорення
Зміщення нестабільності	Коливання зміщення, як правило, моделюються як випадкове блукання зі зміщенням	Випадкове блукання третього порядку

## 2.6. Аналіз сигналу шуму

У цьому розділі ми описуємо техніку, відому як Аллан Варіанс, яка може бути використана для виявлення та визначення властивостей таких процесів. Потім ми застосовуємо цю техніку до акселерометра та сигналів гіроскопа, що

випромінюються від пристрою Xsens Mtx. Mtx – це MEMS IOB, що містить три ортогональні гіроскопи, акселерометри та магнітометри. Пристрій має розмір 38 мм × 53 мм × 21 мм, має масу 30 г і орієнтована в основному на програми захоплення руху людини.

### 2.6.1 Варіація Аллана

Варіація Аллана – це метод аналізу часової області, спочатку розроблений для характеристики шуму та стабілізації в годинникових системах. Ця техніка може бути застосована до будь-якого сигналу для визначення характеру основних шумових процесів. Дисперсія Аллана сигналу є функцією часу усереднення. На час усереднення  $t$ , дисперсія Аллана обчислюється таким чином:

Візьміть великий ряд даних і розділіть їх на відрізки довжиною  $t$ . Повинно бути принаймні 9 розділів даних (інакше отримані результати починають втрачати свою значимість).

Середнє значення даних у кожному контейнері для отримання списку середніх значень ( $a(t)_1, a(t)_2, \dots, a(t)_n$ ), де  $n$  є кількість розділів.

Тоді відхилення Аллана задається:

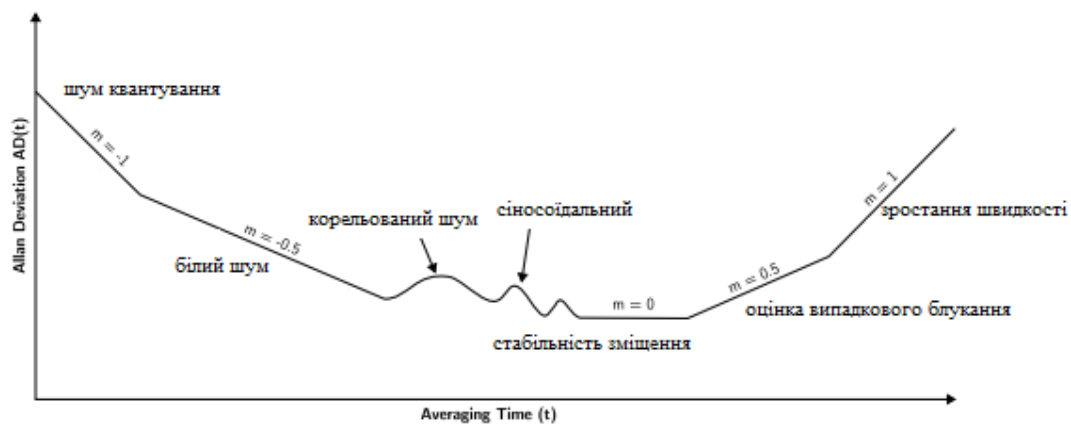
$$AVAR(t) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_i (a(t)_{i+1} - a(t)_i)^2 \quad (2.15)$$

Для визначення характеристик основних шумових процесів, використовуйте девіацію Аллана:

$$AD(t) = \sqrt{AVAR(t)} \quad (2.16)$$

будується як функція від  $t$  за шкалою логарифмічного масштабу. Різні типи випадкових процесів призводять до того, що на графіку з'являються нахили з різними градієнтами, як показано на рисунку 2.10. Крім того, різні процеси

зазвичай з'являються в різних регіонах  $t$ , дозволяючи легко визначити їх присутність. Визначивши процес, можна зчитувати його числові параметри безпосередньо з графіку. Для пристрою MEMS, такого як Mtx, важливими процесами, які ми хочемо виміряти, є нестабільність випадкової прогулянки та зміщення, яку можна визначити та прочитати наступним чином:



**Рисунок 2.10.** Можлива логарифмічна шкала результатів аналізу Аллана Девіації

Білий шум з'являється на ділянці девіація Аллана як схил із градієнтом  $-0,5$ . Вимірювання випадкового блукання для цього шуму (КВБ для гіроскопа, ШВБ для акселерометра) отримується шляхом накладання прямої лінії через схил і зчитування його значення при  $t = 1$ .

Нестабільність упередженості виглядає на ділянці у вигляді плоскої області навколо мінімуму. Числове значення – це мінімальне значення на кривій Аллана.

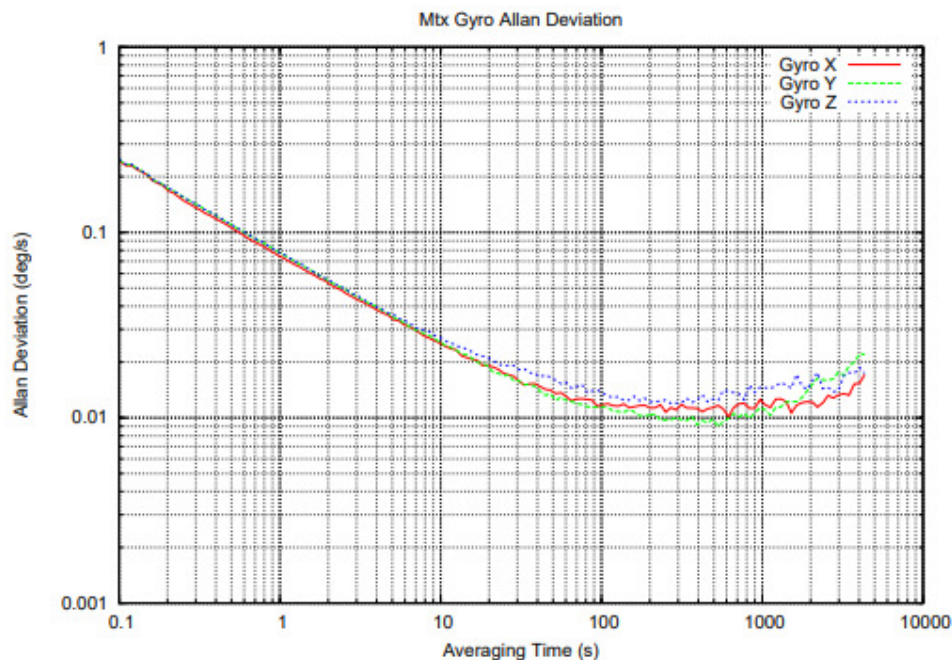
### 2.6.2 Приклад Аналізу по спосіб Аллана

Спосіб варіації Аллана була застосована до вихідних даних, зібраних зі стаціонарного пристрою Mtx із частотою дискретизації 100 Гц. На рисунку 2.11 показані криві відхилення Аллана для осей  $x$ ,  $y$  та  $z$ . Градієнт схилу зліва від ділянки майже точно  $-0,5$ , що вказує на наявність білого шуму, як очікувалося.

У таблиці 4 наведено числові значення шуму, зчитувані з графіку для кожного гіроскопа.

**Таблиця 4.** Вимірювання шуму у гіроскопі

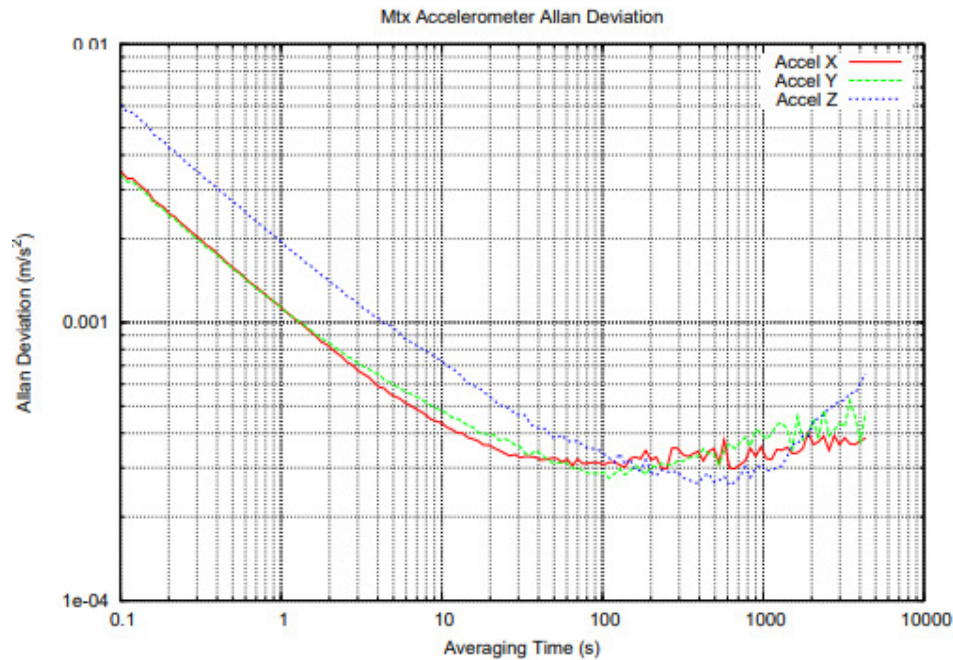
	Нестабільність зміщення	Кут випадкового блукання
X	$\frac{0,010^\circ}{s} = \frac{36^\circ}{\text{час}} (620 \text{ c})$	$\frac{0,075^\circ}{\sqrt{s}} = \frac{4,6^\circ}{\sqrt{\text{час}}}$
Y	$\frac{0,009^\circ}{s} = \frac{32^\circ}{\text{час}} (530 \text{ c})$	$\frac{0,078^\circ}{\sqrt{s}} = \frac{4,8^\circ}{\sqrt{\text{час}}}$
Z	$\frac{0,012^\circ}{s} = \frac{43^\circ}{\text{час}} (270 \text{ c})$	$\frac{0,079^\circ}{\sqrt{s}} = \frac{4,8^\circ}{\sqrt{\text{час}}}$



**Рисунок 2.11.** Графік відхилення Аллана для гіроскопів Mtx.

На рисунку 2.12 показані криві відхилення Аллана для трьох акселерометрів у пристрої Mtx. Цей графік показує, що акселерометр по осі z

має випадкову швидкість ходу, яка майже вдвічі перевищує швидкість інших акселерометрів. Спочатку вважалося, що це може бути наслідком гравітаційного ефекту, або через помилку при вимірюванні коефіцієнта масштабування приладу. Ми двічі перевірили правильність масштабного коефіцієнта та провели аналіз, зробленому з горизонтальною віссю z. Результати були схожі на результати на рисунку 2.12, отже, ми дійшли висновку, що для випробуваного пристрою акселерометр з віссю z чомусь був галасливішим, ніж прилади з віссю x та y. У таблиці 5 наведено числові значення шуму, зчитувані з графіку відхилення Аллана для кожного акселерометра.



Рисунку 2.12. Графік відхилення Аллана для акселерометрів Mtx.

Таблиця 5. Вимірювання шуму у акселерометрі

	Нестабільність зміщення	Швидкість випадкового блукання
X	$3,0 * 10^{-4} \frac{m}{s^2} = 1,1 \frac{m}{год^2} (670 \text{ сек})$	$0,0011 \frac{m}{s^2} = 0,066 \frac{m}{\sqrt{s} \sqrt{год}}$

Y	$2,8 * 10^{-4} \frac{m}{s^2} = 1,0 \frac{m}{год^2} (110 \text{ сек})$	$0,0011 \frac{m}{s^2} = 0,066 \frac{m}{\sqrt{год}}$
Z	$2,6 * 10^{-4} \frac{m}{s^2} = 0,94 \frac{m}{год^2} (620 \text{ сек})$	$0,0020 \frac{m}{s^2} = 0,12 \frac{m}{\sqrt{год}}$

## 2.7. Безплатформенна інерціальна навігація

Орієнтація або ставлення ІНС, щодо глобальної системи відліку відстежується шляхом "інтегрування" сигналу кутової швидкості  $\omega_b(t) = (\omega_{bx}(t), \omega_{by}(t), \omega_{bz}(t))^T$  отримані з гіроскопів швидкості системи. Для того, щоб вказати орієнтацію ІНС, слід використовувати одне з декількох подань. Поширені подання включають кути Ейлера, кватерніони та напрямки косинусів. У цьому розділі представлення напрямних косинусів буде використано для виведення алгоритму відстеження позиції.

У зображенні напрямків косинусів відношення структури тіла визначається знаком «С» матриця обертання  $3 \times 3$ , в якому кожен стовпець є одиничним вектором вздовж однієї з осей тіла конкретизовано з точки зору глобальних осей. Величина вектора  $v_b$  визначений у структурі тіла еквівалентний вектору

$$v_g = C v_b \quad (2.17)$$

визначається в глобальній системі. Зворотне перетворення задається формулою:

$$v_b = C^T v_g \quad (2.18)$$

оскільки інверсія матриці обертання дорівнює її транспонуванню.



Для відстеження ставлення ІНС ми повинні відстежувати  $C$  через час. Якщо відношення в момент часу  $t$  задано через  $C(t)$ , тоді швидкість зміни  $C$  у момент часу  $t$  задано як:

$$\dot{C}(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t + \delta t) - C(t)}{\delta t} \quad (2.19)$$

в якому  $C(t + \delta t)$  можна записати як добуток двох матриць.

$$C(t + \delta t) = C(t) A(t) \quad (2.20)$$

де  $A(t)$  – матриця обертання, яка пов'язує структуру тіла в момент часу  $t$  зі структурою тіла в момент часу  $t + \delta t$ . Якщо  $\delta\varphi$ ,  $\delta\theta$  і  $\delta\psi$  – це малі обертання, за допомогою яких каркас тіла обертася між часами  $t$  і  $t + \delta t$  навколо своїх осей  $x$ ,  $y$  та  $z$  відповідно, то, використовуючи наближення малого кута, ми можемо записати  $A(t)$  як

$$A(t) = I + \delta\Psi \quad (2.21)$$

де

$$\delta\Psi = \begin{pmatrix} 0 & -\delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 0 & -\delta\varphi \\ -\delta\theta & \delta\varphi & 0 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Звідси заміною буде

$$\begin{aligned} \dot{C}(t) &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t + \delta t) - C(t)}{\delta t} \\ &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t)A(t) - C(t)}{\delta t} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t)(I + \delta\Psi) - C(t)}{\delta t} \\ &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t)(I + \delta\Psi) - C(t)}{\delta t} = C(t) \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\Psi}{\delta t} \end{aligned} \quad (2.23)$$

У межі  $\delta t \rightarrow 0$  справедливе наближення малого кута, і

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \Psi}{\delta t} = \Omega(t) \quad (2.24)$$

де

$$\Omega(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{bz}(t) & \omega_{by}(t) \\ \omega_{bz}(t) & 0 & -\omega_{bx}(t) \\ -\omega_{by}(t) & \omega_{bx}(t) & 0 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Це симетрична форма вектора кутової швидкості  $\omega_b(t)$ . Отже, для відстеження орієнтації алгоритм відношення повинен вирішувати диференціальне рівняння

$$\dot{C}(t) = C(t)\Omega(t) \quad (2.26)$$

яке має рішення

$$C(t) = C(0) * \exp\left(\int_0^t \Omega(t) dt\right) \quad (2.27)$$

де  $C(0)$  – початкове ставлення пристрою.

### 2.7.1 Впровадження

Замість того, щоб подавати безперервний сигнал  $\omega_b(t)$ , ІОВ насправді забезпечує зразки кутової швидкості, як правило, з фіксованою частотою. Для інтеграції дискретизованого сигналу повинна використовуватися схема інтегрування вибір схеми залежить від програми. Для короткого часового інтервалу та з низькою точністю, може бути схема достатньо низького порядку, така як правило прямокутника. Для більш вимогливих програм схема третього чи четвертого порядку може бути більш доречною. У цьому розділі представлено рішення прямокутного правила. Нехай період між послідовними

зразками кутової швидкості буде  $\delta t$ . За один період  $[t, t + \delta t]$  рішення рівняння  $(\dot{C}(t) = C(t)\Omega(t))$  можна записати як

$$C(t + \delta t) = C(t) * \exp\left(\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)dt\right) \quad (2.28)$$

За допомогою прямокутного правила ми можемо записати

$$\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)dt = B \quad (2.29)$$

де

$$B = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{bz}\delta t & \omega_{by}\delta t \\ \omega_{bz}\delta t & 0 & -\omega_{bx}\delta t \\ -\omega_{by}\delta t & \omega_{bx}\delta t & 0 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

та  $\omega_b = (\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})^T$  є вибіркою кутової швидкості, що відповідає періоду оновлення. Нехай  $\sigma = |\omega_b\delta t|$ , підставивши рівняння  $\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)dt = B$  у рівняння  $C(t + \delta t) = C(t) * \exp\left(\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)dt\right)$  та, виконавши розкладання Тейлора експоненціального члена, отримаємо

$$\begin{aligned} C(t + \delta t) &= C(t) \left( I + B + \frac{B^2}{2!} + \frac{B^3}{3!} + \frac{B^4}{4!} + \dots \right) \\ &= C(t) \left( I + B + \frac{B^2}{2!} + \frac{\sigma^2 B}{3!} + \frac{\sigma^2 B^2}{4!} + \dots \right) \\ &= C(t) \left( I + \left( 1 - \frac{\sigma^2}{3!} + \frac{\sigma^4}{5!} \dots \right) B + \left( \frac{1}{2!} - \frac{\sigma^2}{4!} + \frac{\sigma^4}{6!} \dots \right) B^2 \right) \quad (2.31) \\ &= C(t) \left( I + \frac{\sin \sigma}{\sigma} B + \frac{1 - \cos \sigma}{\sigma^2} B^2 \right) \end{aligned}$$

що є оновленням рівнянням ставлення, що використовується для оновлення  $C$ , коли кожен новий зразок стає доступним

## 2.7.2 Поширення похибок

Сигнали кутової швидкості, отримані від гіроскопів, "інтегруються" за допомогою стандартного алгоритму відношення ІНС, тому похибки в сигналах гіроскопа поширюються до розрахункової орієнтації. Для більшості пристроїв МЕМС білий шум і невиправлені похибки є основними причинами похибок в орієнтації. Білий шум викликає випадкове блукання під кутом, стандартне відхилення якого зростає пропорційно квадратному кореню часу. Невиправлене зміщення спричиняє похибку в орієнтації, яка з часом зростає лінійно. Похибки квантування також виникають у розрахунковому відношенні через квантування вибірок кутової швидкості та через схему інтегрування, що використовується для оновлення С.

## 2.7.3 Позиції відстеження

Для відстеження положення ІНС сигнал прискорення  $a_b(t) = (a_{bx}(t), a_{by}(t), a_{bz}(t))^T$ , отриманий від акселерометрів, проектується в глобальній системі відліку:

$$a_g(t) = C(t)a_b(t) \quad (2.32)$$

Потім пришвидшення, спричинене силою тяжіння, віднімається, а решту прискорення інтегрується, щоб отримати швидкість, і знову, щоб отримати зміщення:

$$v_g(t) = v_g(0) + \int_0^t a_g(t) - g_g dt \quad (2.33)$$

$$s_g(t) = s_g(0) + \int_0^t v_g(t) dt \quad (2.34)$$

де  $v_g(0)$  – початкова швидкість пристрою,  $s_g(0)$  – початкове переміщення, а  $g_g$  – прискорення, обумовлене силою тяжіння.

Як і для алгоритму відношення, для інтеграції зразків, що надходять з акселерометрів, повинна використовуватися схема інтегрування. Проста реалізація з використанням прямокутного правила використовує такі рівняння оновлення:

$$v_g(t + \delta t) = v_g(t) + \delta t \cdot (a_g(t + \delta t) - g_g) \quad (2.35)$$

$$s_g(t + \delta t) = s_g(t) + \delta t \cdot v_g(t + \delta t) \quad (2.36)$$

Похибки, що виникають в акселерометрах, поширюються через подвійне інтегрування. Це очевидна причина дрейфу у відстежуваному положенні. Похибки в сигналах кутової швидкості також викликають дрейф у розрахунковому положенні, оскільки матриця обертання  $S$ . Отриманий з алгоритму відношення використовується для проектування сигналів прискорення. Похибка в орієнтації викликає неправильну проекцію сигналів прискорення на осі. Це викликає кілька проблем. По-перше, прискорення пристрою інтегруються в неправильному напрямку. По-друге, прискорення під дією сили тяжіння вже не може бути правильно знято.

В алгоритмі стріпдаунда  $1g$  віднімається від сигналу вертикального прискорення, щоб усунути прискорення під дією сили тяжіння до того, як сигнал інтегрується. Помилка нахилу  $\varphi$  спричинить складову прискорення завдяки силі тяжіння з величиною  $g \cdot \sin(\varphi)$  проектування на горизонтальній осі. Це спричиняє залишковий ухил через гравітацію з величиною  $g \cdot \sin(\varphi)$ , що залишається в глобальному масштабі горизонтальними сигналами прискорення. Також буде залишковий зсув величини  $g \cdot (1 - \cos(\varphi))$  у глобальній вертикальній осі, однак це набагато менш суворо, оскільки для малих  $\varphi$  ми маємо  $\cos(\varphi) \rightarrow 1$  і  $\sin(\varphi) \rightarrow \varphi$ . Отже, похибка в положенні, спричинена невеликою похибкою нахилу, буде відбуватися головним чином у глобальній площині  $xy$ .

Поширення похибок гіроскопа до розрахункового положення є критичним шляхом майже в усіх системах ІНС. У більшості додатків величина  $g$  набагато більше середнього абсолютного прискорення самого ІОВ. У таких випадках критичною проблемою є те, що складова прискорення під дією сили тяжіння проектується на горизонтальній осі. Як конкретний приклад розглянемо похибку нахилу  $0,05^\circ$ . Ця похибка спричинить складову прискорення через гравітацію з величиною  $0,0086\text{м/с}^2$  проектування на горизонтальні осі. Це залишкове зміщення спричиняє похибку в горизонтальному положенні, яка зростає квадратично до  $7,7$  м, лише через  $30$  секунд.

#### 2.7.4 Приклад Mtx ІНС

У цьому розділі ми проаналізуємо ефективність прикладу випадіння ІНС, який використовує акселерометри та гіроскопи, що містяться в пристрої Xsens Mtx. Алгоритми ставлення та позиції ІНС, були реалізовані в рамках заснованого на події механізму, написаного на Java. Інтерфейс Java для Xsens Mtx також був написаний у рамках, щоб алгоритми ІНС могли застосовуватися до реальних даних або в режимі реального часу.

Для тестування продуктивності системи було застосовано до  $500$  потоків даних, отриманих від стаціонарного пристрою Mtx. Кожен потік тривав  $60$  секунд. Пристрій було вирівняно за напрямком осі  $z$ , вертикально вгору і початковою позицією пристрою було встановлено глобальне походження  $sg(0) = (0, 0, 0)^T$ . Частота дискретизації пристрою була встановлена на  $100$  Гц. Оскільки пристрій був нерухомим, тоді як дані були отриманий, загальний "дрейф" за певний пробіг за певний час  $t$  можна виміряти як

$$\text{дрейф}(t) = |sg(t)| \quad (2.37)$$

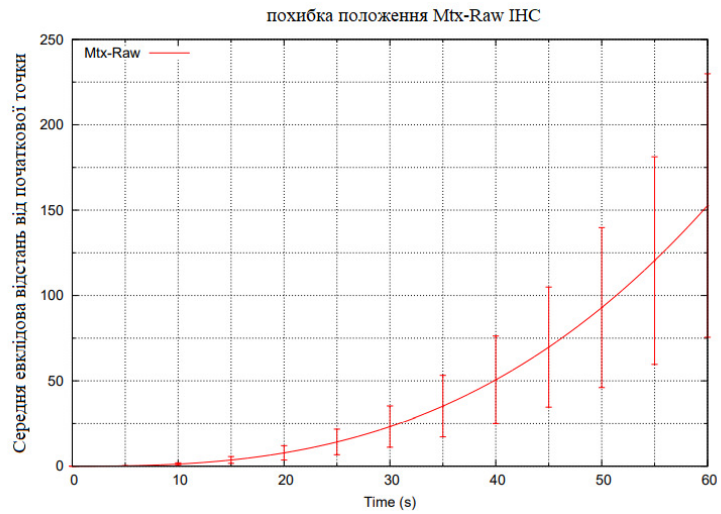
що є евклідівською відстанню між початком координат і позицією, поверненою в той час алгоритмом ІНС. На рисунку 2.13 показано, як середній дрейф (дрейф(t) усереднене за всі 500 прогонів алгоритму) збільшується з часом. Смужки похибок вказують  $\pm \sigma$  значення.

Через 60 секунд середній зафіксований занос становив 152,67 м. Цікаво, що середній дрейф уздовж осі z (дрейф<sub>z</sub>(t) = |s<sub>gz</sub>(t)|) становив лише 1,76 м. Майже весь дрейф відбувся у глобальній площині ху. Це типово для похибки в положенні, спричиненої поширенням невеликої похибки нахилу в орієнтації.

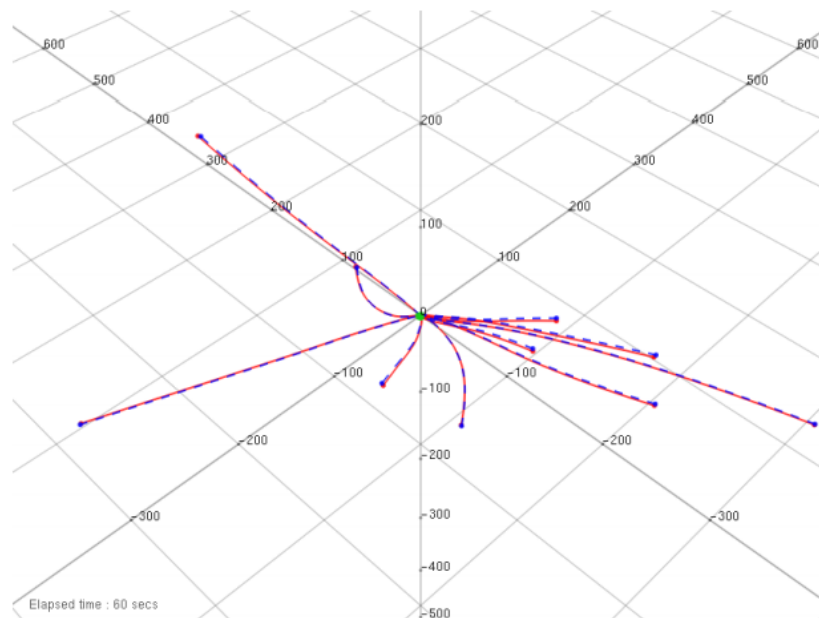
Це свідчить про те, що майже весь зсув системи може бути пов'язаний з похибкою в орієнтації. Щоб перевірити це, ми повторно провели алгоритм на кожному потоці даних із вибірково видаленим акселерометром та шумом гіроскопа. Можна видалити шум із сигналів оскільки було відомо, що пристрій нерухомий і суміщений з віссю z, спрямованою вертикально вгору. Таким чином, щоб усунути будь-який шум в сигналах акселерометра, кожен зразок у потоці просто встановлюється на значення  $a_b(t) = (0, 0, -g)^T$ , де g – це прискорення за рахунок сили тяжіння. Так само видаляється шум гіроскопа встановивши для кожної вибірки кутової швидкості значення  $\omega_b(t) = (0, 0, 0)^T$ . На рисунку 2.14 показані результати, отримані шляхом вибіркового видалення шуму за 10 проб. На рисунку 2.15 показано середній дрейф, який зазнав гіроскоп, а шум акселерометра вибірково усувається. Видалення шуму акселерометра впливає незначно на зменшення дрейфу, доводячи, що похибки в орієнтації, що поширюються за допомогою алгоритму, безумовно є основним джерелом похибок в системі.

Подальше розуміння короткострокової роботи системи можна отримати на на рисунку 2.15, як показано на рисунку 2.16. На графіку видно, що спочатку шум акселерометра є основною причиною дрейфу в системі, але всього 0,3 секунди. Через цей час похибка в орієнтації, спричинена шумами в сигналах гіроскопа, стає основною причиною дрейфу. Після того, як алгоритм працював

більше кількох секунд, дрейф, який можна віднести до шуму акселерометра, є незначним.

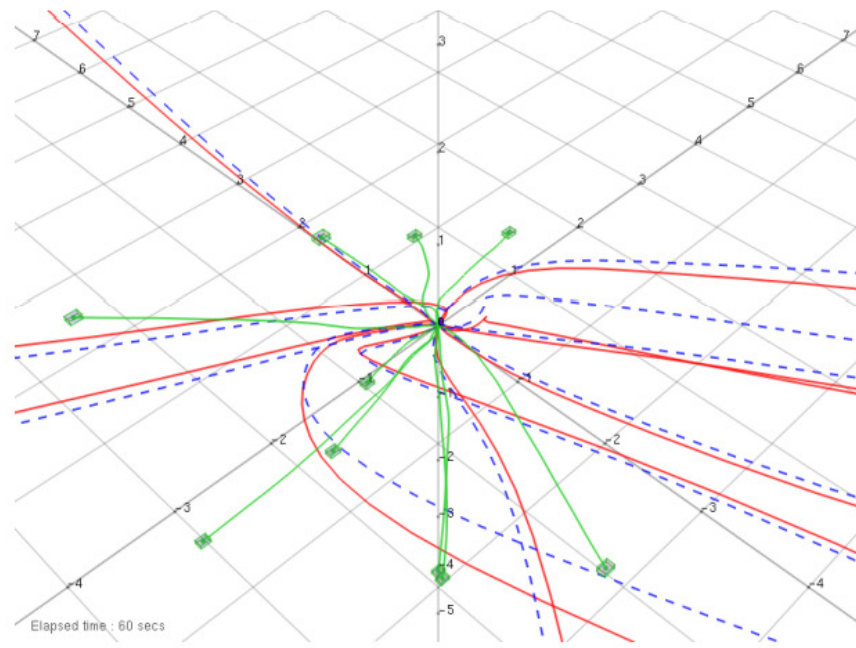


**Рисунок 2.13.** Графік, що показує середній дрейф спричиненому системою, збільшується з часом



**Рисунок 2.14(а).** Зменшено. Шляхи, отримані після видалення шуму гіроскопа, не видно.





(b) Zoomed in, showing the paths obtained after all gyroscope noise was removed.

**Рисунок 2.14(b).** Збільшено, показуючи шляхи, отримані після видалення всіх шумів гіроскопа.

**Рисунок 2.14.** Десять траєкторій, отриманих шляхом застосування алгоритму стріпдаунда до стаціонарного пристрою Xsens протягом 60 секунд. Тверді (червоні) шляхи – це шляхи, отримані шляхом застосування алгоритму до вихідного гіроскопа та дані акселерометра. Штрихові (сині) шляхи були отримані шляхом застосування алгоритму до потоку даних після видалення всіх шумів акселерометра. Тверді (світло-зелені) шляхи були отримані після усунення всіх шумів гіроскопа. Шкала вказана в метрах.

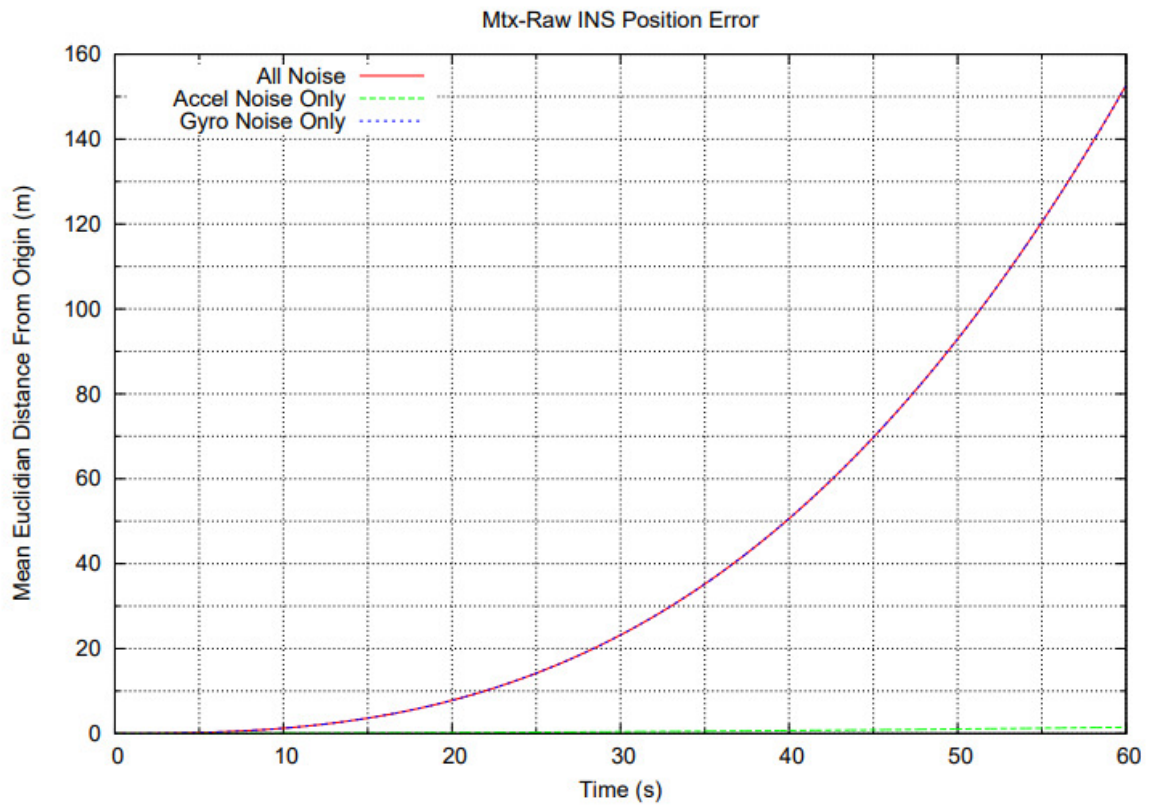


Рисунок 2.15. Середній дрейф із вибірково видаленими джерелами шуму.

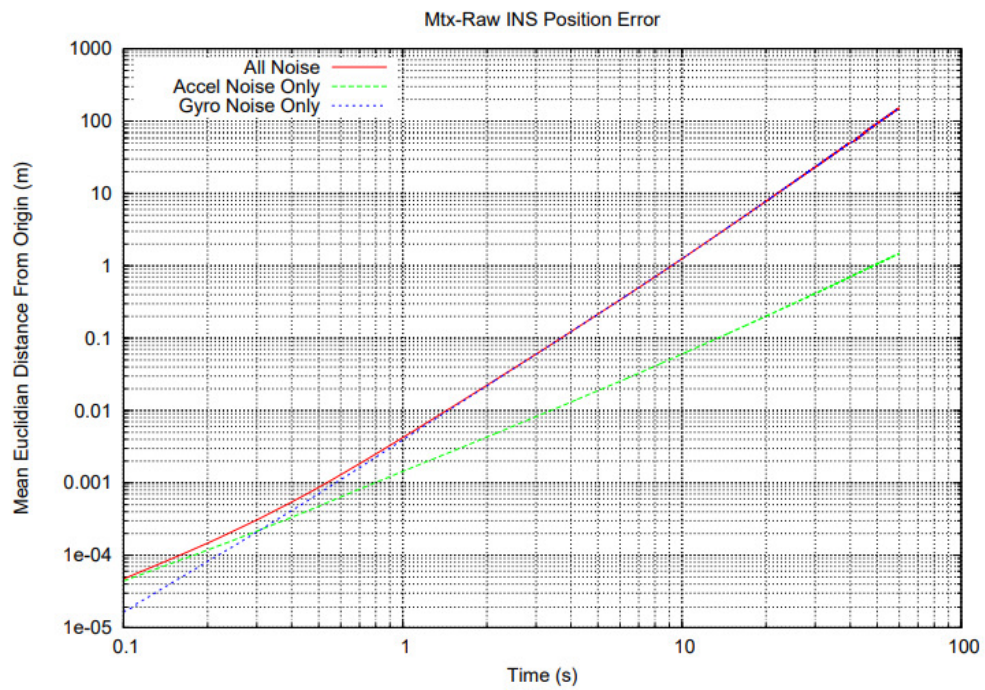


Рисунок 2.16. Графік журналу середнього заносу із вибірково видаленими джерелами шуму.

## Висновок

Основні джерела похибок, викладені в цьому розділі, узагальнені в таблиці 2. Відносна важливість кожного джерела похибок різниться в різних гіроскопах. Для гіроскопів MEMS похибки випадкового блукання(шуму) та некореговані помилки зміщення, спричинені некомпенсованими коливаннями температури, або помилка в початковій оцінці зміщення, як правило, є найбільш важливими джерелами помилок. Випадкове блукання під кутом може бути використана як нижня межа невизначеності орієнтації, отриманої в результаті інтегрування сигналу гіроскопа швидкості.

Основні джерела похибок для акселерометрів MEMS подібні до джерел похибок для гіроскопів. У таблиці 3 узагальнено джерела помилок, представлені в цьому розділі. Для пристроїв MEMS кутові випадкові прогулянки (шум) та некореговані помилки, як правило, є джерелами помилок, які обмежують продуктивність пристрою, проте відносна важливість кожного джерела помилок залежить від конкретного пристрою, що використовується.

Також описані алгоритми ставлення та позиції ІНС. Також було обговорено поширення помилок, що виникають в окремих гіроскопах та акселерометрах. На практиці саме точність гіроскопів, а не акселерометри обмежують загальну точність більшості ІНС. Помилка обчислюваної орієнтації призводить до неправильного проектування сигналів прискорення тіла, отриманих від ІНС, на глобальній осі. Це призводить до швидко накопичувальної помилки в положенні, коли сигнали згодом інтегруються. Простий ІНС був реалізований на базі пристрою Xsens Mtx. Показано, що стаціонарна ефективність системи була поганою, оскільки середній дрейф становив 152,67 м через 60 секунд. Майже весь цей дрейф можна віднести до помилок орієнтації, що поширюються через алгоритм ІНС.

На практиці необхідно зменшити відхилення ІНС, заснованих на MEMS, таких як представлені в цьому звіті. Цього можна досягти за допомогою

методів плавлення датчиків, часто використовуючи додаткові дані із систем абсолютного позиціонування та магнітометрів. Дрейф також можна зменшити, використовуючи обмеження, які, як відомо, застосовуються до руху ІОВ, такі як відомі моменти часу, коли пристрій повинен мати нульову швидкість.

Сучасний інерційний датчик МЕМС (який включає магнітометри для зменшення дрейфу в орієнтації) може бути використаний для побудови інерційних навігаційних систем, які переносять середній дрейф близько 5 м після 60 секунд стаціонарної роботи. В даний час неможливо побудувати ІНС, який підтримує точність вимірювача більше 60 секунд, використовуючи пристрої МЕМС.

## Список використаної літератури

1. Д. Тіттертон і Дж. Вестон. Технологія інерціальної навігації Strapdown. Американський інститут ім Аеронавтика та космонавтика, друге видання, 2004.
2. Даніель Ротенберг. Інерційне та магнітне зондування руху людини. Кандидатська дисертація, Університет Твенте, 2006 рік.
3. Е. Фоклін. Довідник з технологій віртуального середовища, глава Технології відстеження руху і Вимоги, сторінки 163–210. Видавництво Лоуренса Ерлбаума, 2002.
4. IEEE Std 962-1997 (R2003) Посібник із форматування стандартної специфікації та процедура випробування для одновісної осі Інтерферометричні волоконно-оптичні гіроскопи, Додаток С. IEEE, 2003.

### Розділ 3. Метод варіації Алана для оцінки параметрів дрейфу

Варіація Аллана (ВА), розроблена в 1960-х роках Девідом Алланом, для оцінки стандартів частоти. Метод варіації Аллана дозволяє аналізувати тимчасові послідовності для визначення характеристик шумів в функції часу усереднення. Більше 40 років тому методика створювалася для оцінки нестабільності годин в супутникових навігаційних системах, а зараз вона застосовується з метою аналізу шуму для інших систем, в тому числі і гіроскопічних приладів.

Варіація Аллана має ряд переваг в порівнянні з іншими методами дослідження похибок приладу:

- немає ніяких теоретичних обмежень застосування цього методу для різних типів вимірюваних величин, тому що він не пов'язаний з якою-небудь фізичною моделлю стандарту, його основа – вимірювання;
- метод дозволяє описувати поведінку вихідного сигналу на різних ділянках усереднення, починаючи від періоду рівного інтервалу між відліками.

Обидва ці властивості дозволяють застосовувати варіацію Аллана для дослідження різних рядів вимірювань, в тому числі і для твердотільних хвильових гіроскопів, які працюють в режимі датчика кутової швидкості.

Варіація Аллана дозволяє оцінити стабільність показань різних приладів і пристроїв, визначаючи дисперсії різниці сусідніх відхилень. Це метод уявлення середньоквадратичного випадкового дрейфу в залежності від часу усереднення. Він простий в обчисленнях, значно краще підходить для аналізу шуму, ніж просте обчислення середньоквадратичного відхилення (СКВ), щодо простий для інтерпретації та розуміння. Метод не дуже добре підходить для суворого

аналізу, але є розумним рішенням в процесі підготовки моделей помилок

Кафедра АКСУ		ІНСТИТУТ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАЗ			
Виконав	Суховаров С.О.	<b>Метод варіації Алана для оцінки параметрів дрейфу</b>	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Чиковані Р.Р.		Error Unknown switch argument.	150	
Консульт.	Чиковані В.В.		602	6.050201	
Н контр	Чиковані В.В.				
Зав. каф.	Тачініна О.М.				

датчиків. Класичний вид варіації Аллана описаний формулою:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)^2 \quad (3.1)$$

де  $\sigma_A^2$  – варіація Аллана,  $\tau$  – інтервал усереднення,  $x_k (k = 1, 2 \dots N)$  – усереднення вибірки вимірювань на часі  $\tau$ . У більшості випадків використовується не варіація Аллана, а відхилення Аллана, яке визначається як квадратний корінь з варіації. Потім будують графік відхилення варіації Аллана, далі проводиться аналіз різних ділянок нахилів цієї кривої, за якими судять про присутність всіляких складових похибки.

Для датчика кутової швидкості варіацію Аллана модифікують. З урахуванням того, що інформація з датчика отримана у вигляді кута повороту, наближене значення кутової швидкості отримують за допомогою кінцево-разностной апроксимації на відрізьку часу, рівному інтервалу осереднення. Використовується вихідний сигнал гіроскопа по куту  $\theta(t)$ , виміряний  $N$  разів, з кроком вимірювання  $\tau_0$ .

Формула (3.1) набуває вигляду:

$$\sigma_A^2(n * \tau_0) = \frac{1}{2(n * \tau_0)^2 (N - 2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (\theta_{k+2n} - 2\theta_{k+n} - \theta_k)^2 \quad (3.2)$$

де  $N$  – кількість вимірювань,

$n$  – кратність інтервалу усереднення даних ( $n = 1, 2 \dots n_{max} \leq \frac{N-1}{2}$ ),

$\tau = n\tau_0$  – інтервал усереднення даних,

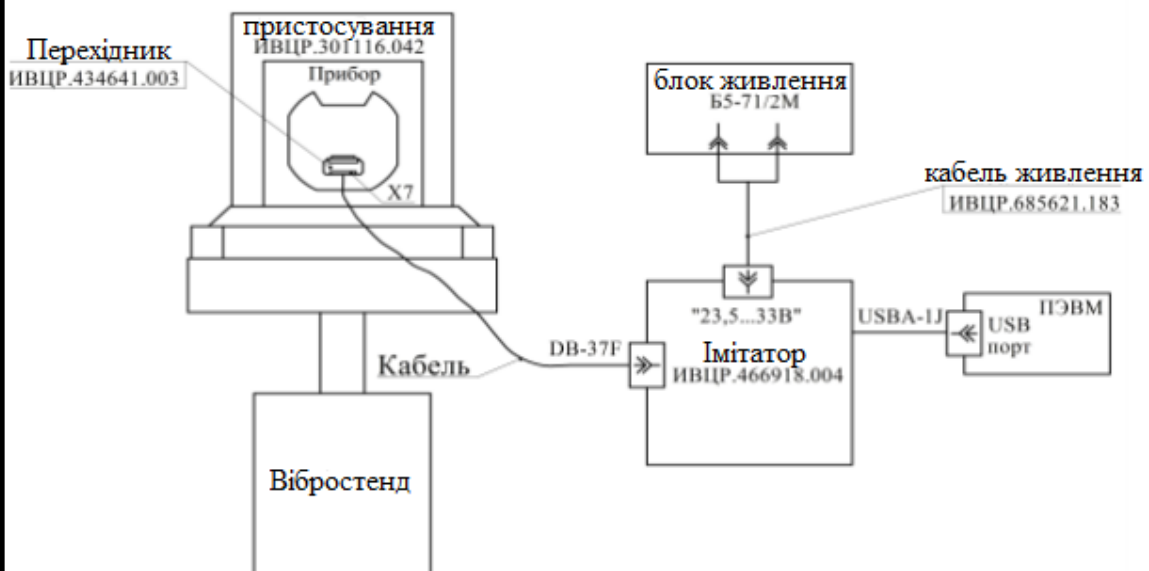
$\tau_0$  – крок вимірювача,

$\theta$  – значення вихідного сигналу, розподілених на інтервалі  $\tau$ .

У натуральному вираженні (49) використана кінцево–різницева апроксимація кутової швидкості по дискретним значенням кута повороту на відрізку часу усереднення  $\tau$ . Потім, як і при застосуванні класичного методу, визначається відхилення Аллана, будується графік кривої відхилення в логарифмічному масштабі, де по осі ординат відкладається саме відхилення, а по осі абсцис час осереднення  $\tau$ . Далі здійснюється аналіз кривої і визначаються шумові складові сигналу.

### 3.1. Програма розрахунку варіації Аллана

Для отримання шумових складових в вимірювальній інформації ТХГ в режимі ДКШ розглянуто дослідний зразок приладу виробництва АТ «ІЕМЗ» Купол». Вихідний сигнал приладу отримано та опрацьовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення АТ «ІЕМЗ» Купол », яка призначена для знімання даних з гіроскопічних приладів. На рисунку 3.1



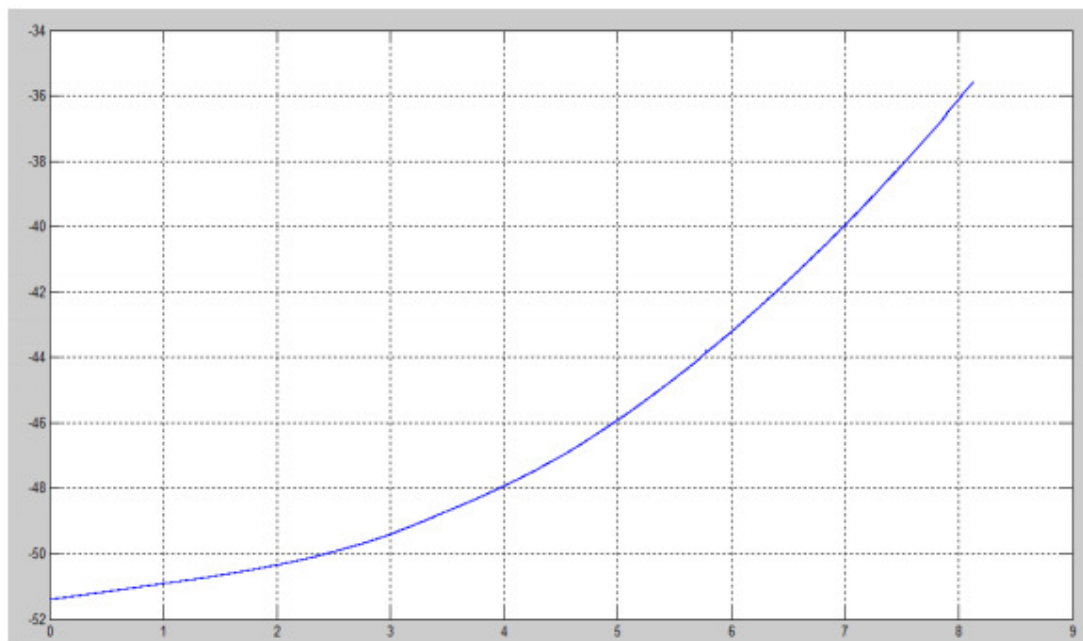
приведена схема робочого місця для проведення випробування приладів.

**Рисунок 3.1.** Схема робочого місця



Після прийому даних, імітатор здійснює за допомогою програмного забезпечення перетворення аналогового сигналу, отриманого з приладу, через USB з'єднання. В результаті на ПЕОМ отримуємо величину кута орієнтації стоячій хвилі (або кут повороту підстави. Знімання інформації проводився протягом півгодини на нерухомому підставі, дані отримані щодо швидкості Землі.

На рисунку 3.2 показана крива зміни кута, де по осі абсцис відкладається

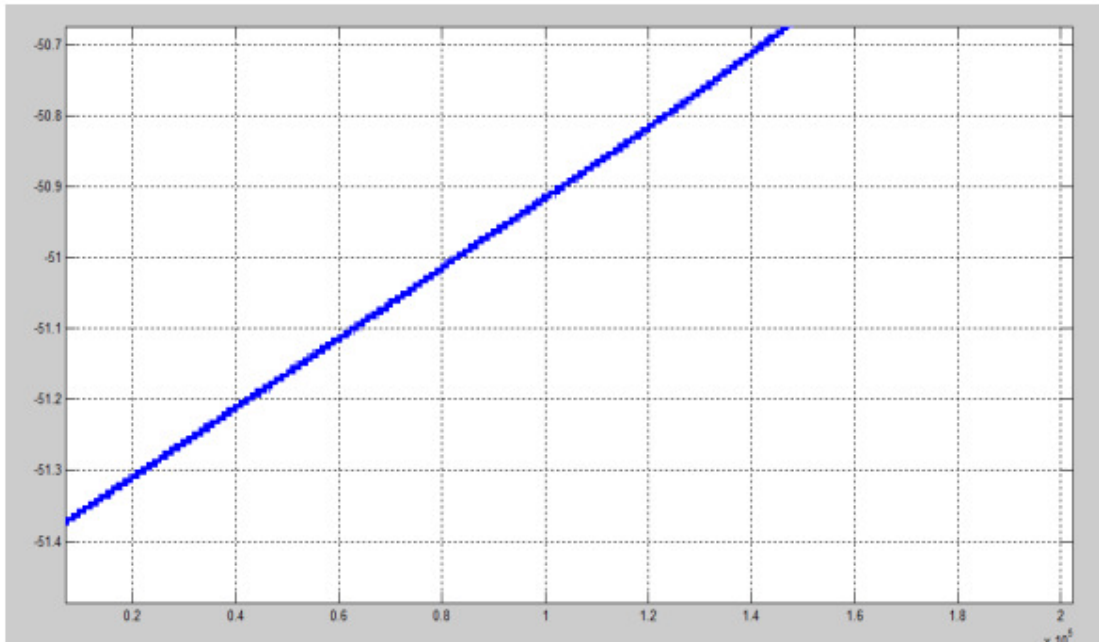


кількість вимірювань, а по осі ординат

кут.

**Рисунок 3.2.** Вихідні дані ТХГ по куту

При достатньому збільшенні видно, що вихідний сигнал з ТХГ за шумленням (рисунком 3.3).



**Рисунок 3.3.** Зашумлений сигнал

За отриманими даними розраховуємо варіацію Аллана за формулою (3.2). Програма розрахунку варіації Аллана складена за допомогою засобів програмування середовища MATLAB. Також розраховувалося відхилення Аллана як корінь квадратний з варіації. На рисунках 3.4 і 3.5 представлені фрагменти коду для розрахунку варіації Аллана, в тому числі та початкові дані (рисунком 3.4), програма розрахунку варіації і відхилення Аллана і побудови графіка кривої Аллана (рисунком 3.5).

```
guidata(hObject, handles);  
grid on  
T=0;  
sigma=0;  
b=0;  
n=0;  
k=0;  
q=0;  
r=0;
```

**Рисунок 3.4.** Змінні дані варіації Аллана

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
sig=get(handles.edit1,'String');
omega=dlmread(sig);
fs = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
pts = str2double(get(handles.edit4, 'String'));

[N,M]=size(omega);
n=2.^(0:floor(log2(N/2)));
maxN=n(end);
endLogInc=log10(maxN);
m=unique(ceil(logspace(0,endLogInc,pts)));
t0=1/fs;
T=m*t0;
theta=omega;
sigma2=zeros(length(T),M);

len=length(m);

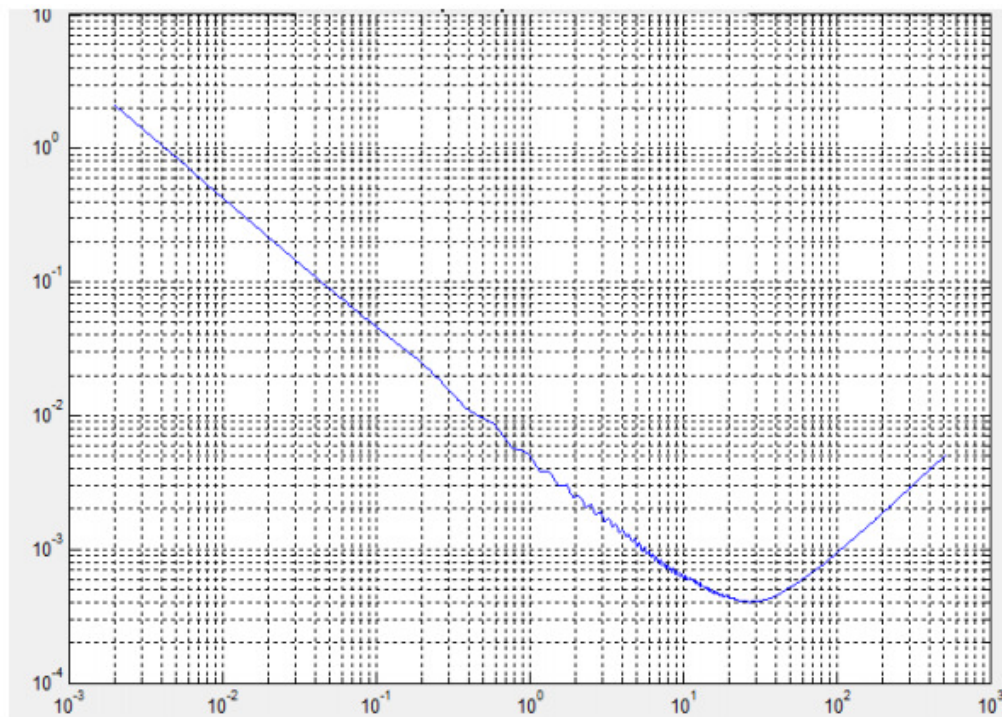
for i=1:len
    for k=1:N-2*m(i)
        sigma2(i,:)=sigma2(i,:)+(theta(k+2*m(i):-
2*theta(k+m(i):-)+theta(k,:).^2;
    end
end

sigma2=sigma2./repmat((2*T.^2.*(N-2*m)),1,M);
sigma=sqrt(sigma2);
loglog(T,sigma);

```

### Рисунок 3.5. Програма розрахунку варіації Аллана і відхилення Аллана

Результатом програми розрахунку є побудова кривої відхилення Аллана в логарифмічному масштабі, де по осі ординат відкладається саме відхилення, а по осі абсцис час осереднення  $\tau$  (рисунок 3.6).



**Рисунок 3.6.** Крива відхилення Аллана

Суть методу варіації Аллана для оцінки шумових складових складається в обчисленні дисперсій не самих відхилень центрованого випадкового процесу, як це робиться при визначенні класичної вибіркової дисперсії, а різниці сусідніх відхилень.

Варіація Аллана пов'язана зі спектральною щільністю шуму співвідношенням:

$$\sigma_A^2 = 4 \int_0^{\infty} P(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (3.3)$$

апроксимує вираз для залежності зміни варіації Аллана від часу осереднення  $\tau$  у вигляді наступного узагальненого многочлена:

$$\sigma_A^2 \approx P_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2} \quad (3.4)$$

де  $B$  – коефіцієнт нестабільності (дрейфу) нульового сигналу (зміщення нуля),  $K$  – коефіцієнт випадкового догляду кутової швидкості;  $N$  – коефіцієнт випадкового кутового догляду – спектральної щільності потужності шуму,

Q – коефіцієнт шуму квантування вихідного сигналу; R – коефіцієнт лінійного зміни кутової швидкості.

У таблиці 6 наведені співвідношення між параметрами розкладання варіації Аллана і спектральної щільністю шуму.

Таблиця 6

Тип похибки: шум / варіація	Спектральна щільність шуму P(f)	Варіація Аллана $\sigma_A^2$	Коефіцієнт многочлена $P_A^2(\tau)$
Білий шум квантування / шум квантування	$(2\pi f)^2 Q^2 \tau_0$ при $f < 1/2\tau_0$	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$	Q-похибка квантування вихідного сигналу
Мерехтіння шум Вихідного сигналу / нестабільність зміщення нуля	$\left(\frac{B^2}{2\pi}\right) \frac{1}{f}$ при $f \leq f_0$ ; 0 при $f > f_0$	$B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + \Delta(f_0)$ $\approx B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2$	B-коефіцієнт нестабільності зміщення 0
Білий шум збільшення вихідного сигналу / випадкове блукання вихідного сигналу	$N^2$	$\frac{N^2}{\tau}$	N- коефіцієнт випадкового блукання вихідного сигналу

Таблиця 6 (продовження)

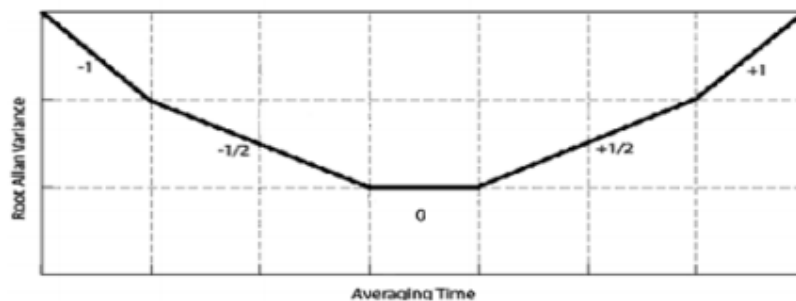
Тип похибки: шум /	Спектральна	Варіація Аллана	Коефіцієнт
--------------------	-------------	-----------------	------------

варіація	щільність шуму P(f)	$\sigma_A^2$	многочлена $P_A^2(\tau)$
Білий шум зміни швидкості зміни вихідного сигналу / випадкове блукання кутової швидкості	$\left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2}$	$\frac{K^2\tau}{3}$	К-коефіцієнт випадкового блукання швидкості
Тренд збільшення вихідного сигналу	$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$	$\frac{R^2\tau^2}{2}$	Р-коефіцієнт випадкового догляду вихідного сигналу

Величина  $\Delta(f_0)$  визначається виразом:

$$-\frac{\sin^3}{2x^2}(\sin x + 4x\cos x) + c_i(4x); c_i(x) = -\int_0^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt, \text{ де } x = \pi f\tau$$

Кожна шумова характеристика на кривій відхилення Аллана має свій нахил (рисунок 3.7), в таблиці 7 вказані характерні значення кутів нахилу для кожної шумовий складової.



**Рисунок 3.7.** Характерні нахили графіка кривої відхилення Аллана

Таблиця 7.

Нахил графіка	Тип похибки шум / варіація
---------------	----------------------------

Error! Unknown switch argument.

-1	Білий шум квантування
-0,5	Мерехтіння шум вихідного сигналу
0	Білий шум збільшення вихідного сигналу
0,5	Білий шум зміни швидкості зміни вихідного сигналу
1	Тренд збільшення вихідного сигналу

Для визначення інтенсивності кожної з шумових складових і оцінки її впливу на вихідні параметри потрібно отримати чисельні значення коефіцієнтів многочлена. Один з методів побудови найкращого наближення є метод найменших квадратів (МНК).

Метод найменших квадратів – математичний метод, застосовуваний для вирішення різних завдань, заснованих на мінімізації суми квадратів відхилень деяких функцій від шуканих змінних. Метод може бути використаний для апроксимації функції, заданої таблично у вигляді безлічі дискретних (точкових) значень.

Суть методу полягає в тому, що для вихідних даних, отриманих експериментально, відшукується аналітична залежність, сума квадратів відхилень якій у всіх вузлових точках повинна бути мінімальною. Нехай задана система лінійно незалежних  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  на відрізку  $[a, b]$ ,  $m \leq n$ . щоб побудувати аналітичний вираз для заданої функції, складається узагальнений многочлен  $\Phi(x)$  з цих функцій, за умови що величина

$$J = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - \Phi(x_i)]^2 \quad (3.5)$$

матиме найменше можливе значення. Узагальнений многочлен має вигляд

$$\Phi(x) = c_0\varphi_0(x) + c_1\varphi_1(x) + \dots + c_m\varphi_m(x) \quad (3.6)$$

Якщо даний многочлен є многочленом найкращого наближення, то його коефіцієнти задовольняють системі рівнянь

$$\sum_{j=0}^m c_j(\varphi_j, \varphi_k) = (f, \varphi_k) \quad (3.7)$$

де  $k = 0, 1, 2 \dots m$ .

Рівності є необхідною умовою досягнення мінімуму величини  $J: \frac{\partial J}{\partial c_k} = 0$

В результаті рішення системи лінійних рівнянь, отримують значення коефіцієнтів апроксимації  $c_0, c_1, \dots, c_m$ .

Апроксимацію кривої відхилення Аллана виконуємо за програмою Matlab, так як вбудовані функції даного пакета дозволяють спростити цю процедуру в кілька разів.

Для апроксимації даних, отриманих методом варіації Аллана, узагальненим многочленом за методом найменших квадратів, скористаємося функцією **Matlab Curve Fitting Toolbox**. Спочатку виберемо спосіб апроксимації, задамо його за допомогою команди **fitoptions**. Потім вводимо в неї потрібну інформацію: назву методу, алгоритм. Створюємо параметричну модель за допомогою функції **fittype**, як цієї моделі використовуємо узагальнений многочлен. За допомогою функції **fit** визначаємо коефіцієнти апроксимації.

Дані для чисельного рішення задачі апроксимації: крок опитування вимірювача (T), що апроксимується дискретно задана функція (sigma2) і апроксимуючий многочлен (f). На рисунку 3.8 зображений фрагмент програми, що відображає описані вище дії.



```

format long
s=fitoptions('Method','NonLinearLeastSquares','Algorithm','Trust-
Region','DiffMinChange',
1.0e-8,'DiffMaxChange',0.1,'MaxFunEvals',600,'MaxIter',400,'TolFun',
1.0e-10,'TolX',1.0e-10,'Lower',-Inf,'Upper',Inf);

f=fitype('r^2*x^2/2+k^2*x/3+b^2*2/pi*log(2)+n^2*1/x+q^2*3/x^2','options',s);

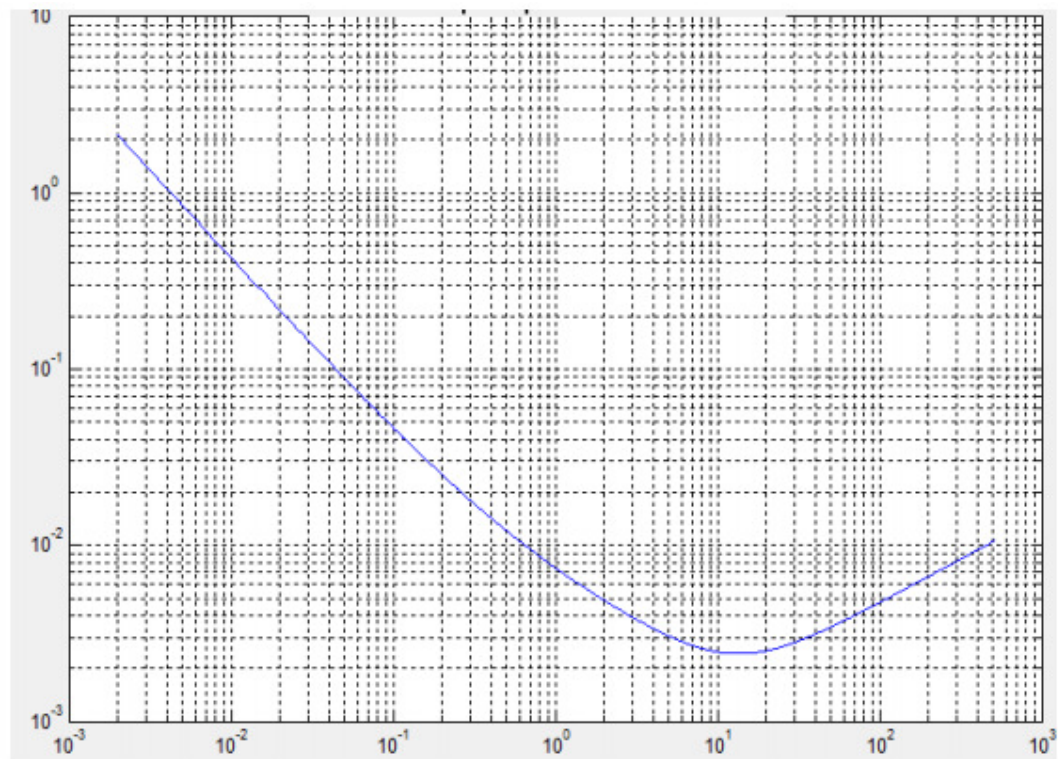
[c2,gof2]=fit(T,sigma2,f)

```

**Рисунку 3.8.** Код для апроксимації кривої відхилення Аллана

Для візуалізації вихідних даних і знайденої параметричної моделі скористаємося функцією plot, чисельні значення коефіцієнтів програма видає автоматично, при застосуванні команди fit.

На рисунку 3.9 в логарифмічному масштабі по обох осях зображений апроксимуючий многочлен по МНК для кривої відхилення Аллана.



**Рисунок 3.9.** Апроксимуючий многочлен

Фрагмент лістингу програми, що містить чисельні значення коефіцієнтів для оцінки шумових складових ТХГ в режимі ДКШ, розраховані з 95% точністю (рисунок 3.9)

General model:

$$c2(x) = r^2 * x^2 / 2 + k^2 * x / 3 + b^2 * 2 / \pi * \log(2) + n^2 * 1 / x + q^2 * 3 / x^2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$b = 6.619e-005 (-0.1306, 0.1307)$$

$$k = 0.00081 (0.0005015, 0.001119)$$

$$n = 0.006153 (0.006103, 0.006202)$$

$$q = 0.00245 (0.00245, 0.00245)$$

$$r = 1.039e-008 (-0.004304, 0.004304)$$

**Рисунок 3.10.** Чисельні значення коефіцієнтів узагальненого многочлена

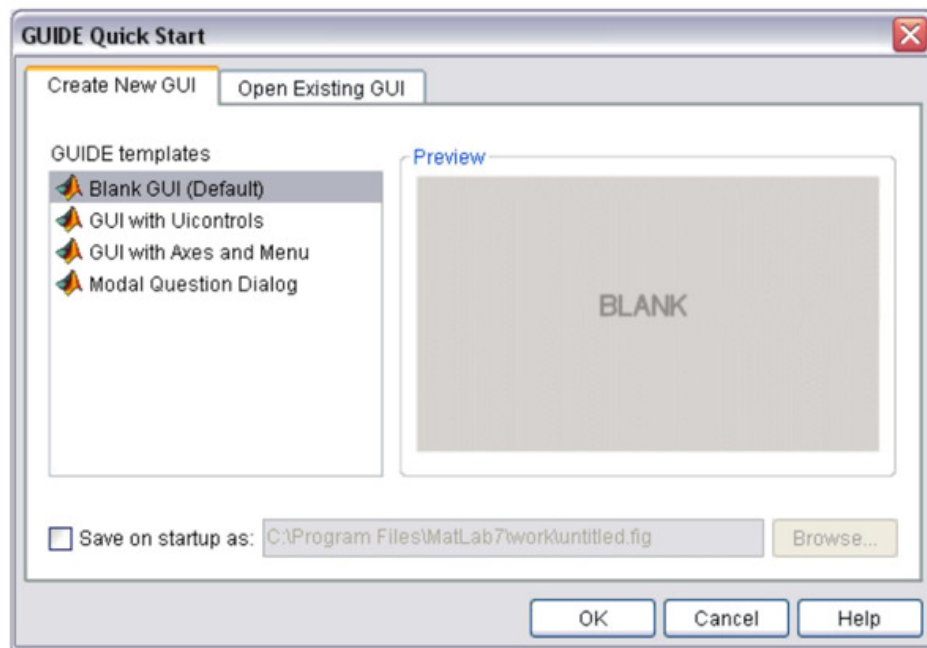
Звідси:  $b=B$ ,  $k=K$ ,  $n=N$ ,  $q=Q$ ,  $r=R$ .

### **3.2. Організація графічного призначеного для користувача інтерфейсу і результати роботи**

Для обробки вихідної інформації приладу за методом варіації Аллана розроблено програмне забезпечення з використанням засобів середовища програмного забезпечення Matlab, а так само був організований графічний інтерфейс. Для реалізації графічного інтерфейсу використано засіб візуального програмування GUI (Graphic User Interface), що входить в пакет програм Matlab. Переваги програмного створення GUI:

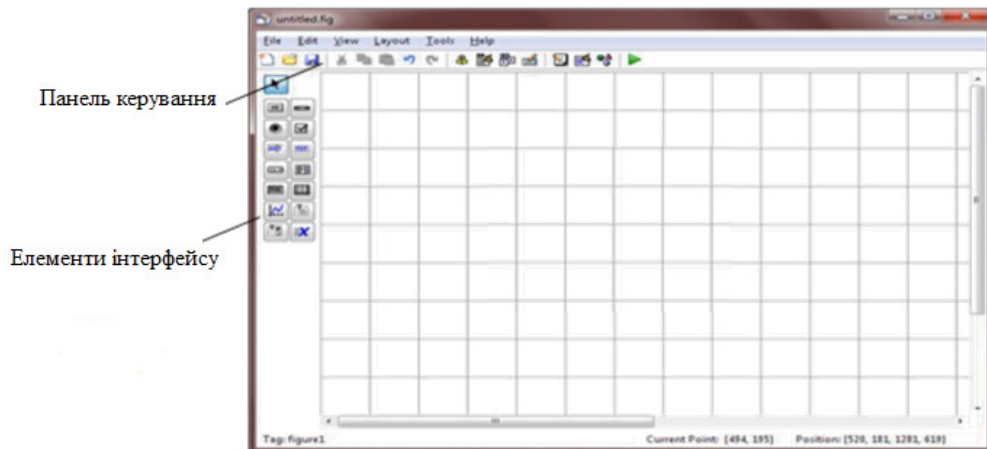
- легко створити код, так як весь код для інтерфейсу генерується самим Matlab;
- легке управління кодом (код краще структурований, легше створювати нові елементи і видаляти старі).

На рисунку 3.11 показано діалогове вікно створення графічного інтерфейсу.



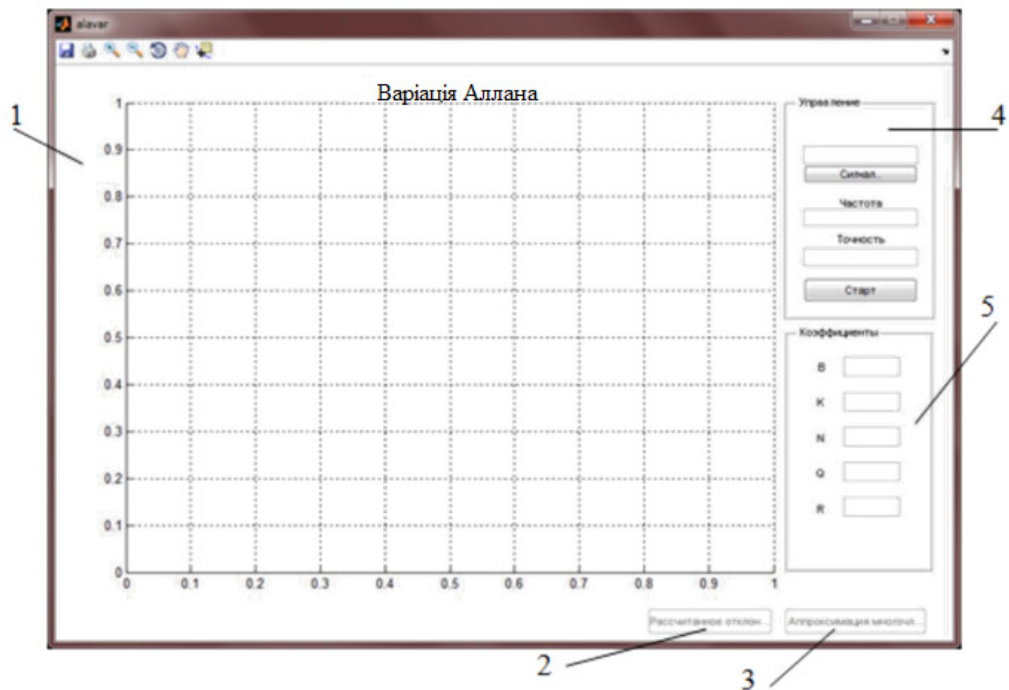
**Рисунок 3.11.** Діалогове вікно для запуску програми

За допомогою вкладки Create New GUI створюємо новий додаток, вибравши команду Blank GUI, отримаємо заготовку для створення додатка (рисунок 3.12).



**Рисунок 3.12.** середа з заготовлею для вікна програми

На рисунку 3.13 показаний графічний інтерфейс для програми розрахунку варіації Аллана і апроксимації цієї кривої узагальненим многочленом, створеної за допомогою середовища MATLAB.



**Рисунок 3.13.** графічний інтерфейс розрахунку варіації Аллана: 1 – логарифмічна сітка для відображення кривих; 2,3 – кнопки перемикання відображення різних кривих; 4 – блок управління програмою, 5 – блок відображення коефіцієнтів апроксимації.

За допомогою блоку управління імпортуються дані вихідного сигналу для подальшої обробки в програмі, а так же задається точність, з допомогою якої визначається число точок для логарифмічної сітки і частота, яка визначає крок. На логарифмічній сітці відображаються крива відхилення Аллана або апроксимація кривої відхилення Аллана, вибрати потрібний графік можна за допомогою відповідних кнопок на панелі. Чисельні значення коефіцієнтів апроксимації відображаються в поле «коефіцієнти».

На рисунку 3.14 і 3.15 показаний приклад роботи програми, відхилення Аллана і апроксимація кривої відхилення Аллана многочленом відповідно.

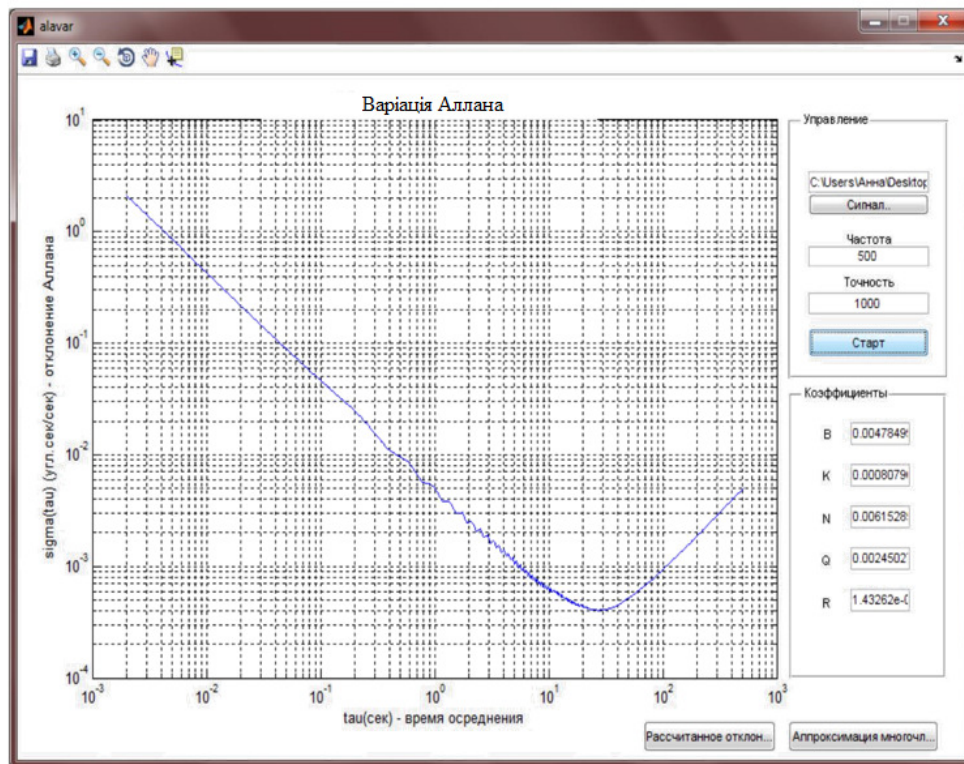


Рисунок 3.14. Відхилення Аллана на графічному інтерфейсі

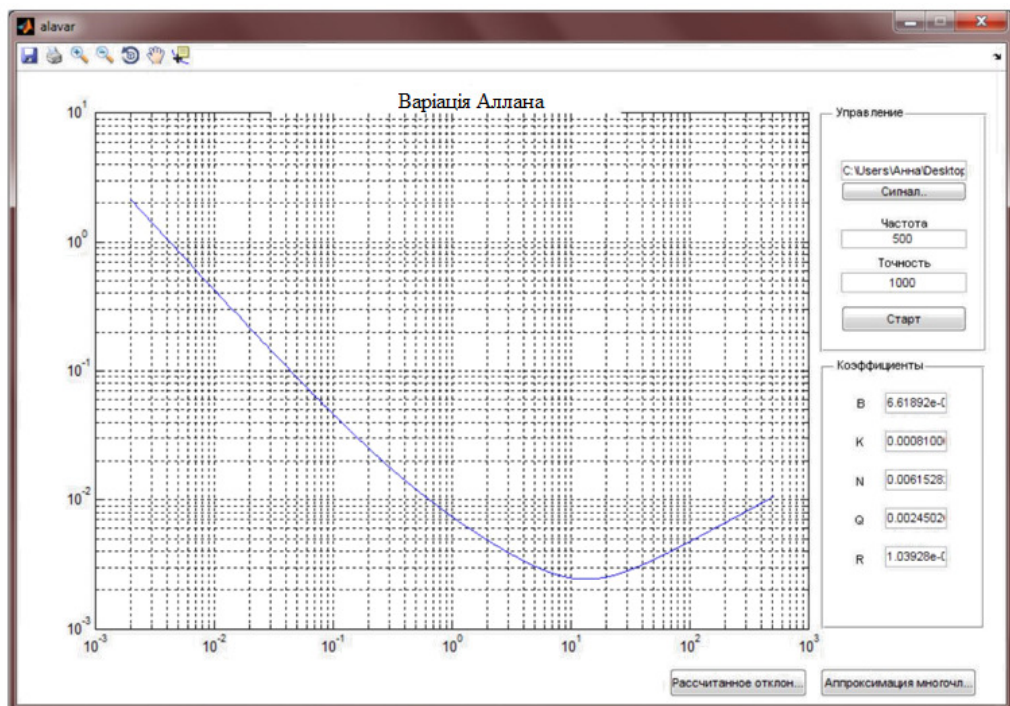


Рисунок 3.15. Апроксимация кривой відхилення Аллана многочленом на графічному інтерфейсі

Після апроксимації кривої відхилення Аллана отримуємо чисельні значення коефіцієнтів шумових складових:

$B$  – коефіцієнт нестабільності (дрейфу) нульового сигналу (зміщення нуля,  $B = 6,619 * 10^{-5}$  град/с;

$K$  – коефіцієнт випадкового догляду кутової швидкості,  $K = 8,1 * 10^{-4}$  град/с<sup>2</sup>;

$N$  – коефіцієнт випадкового кутового догляду – спектральної щільності

потужності шуму,  $N = 6,15 * 10^{-3}$ град/√с;

$Q$  – коефіцієнт шуму квантування вихідного сигналу,  $Q = 2,45 * 10^{-3}$  град;

$R$  – коефіцієнт лінійного зміни кутової швидкості,  $R = 1,039 * 10^{-8}$  град/с<sup>2</sup>.

Достовірність обчислень за програмою побічно підтверджується на підставі порівняння отриманих чисельних результатів з даними для приладів гіроскопічного типу, отриманими за методом варіації Аллана. Для прикладу взяті дані ВОГ. Результати порівняння наведені в таблиці 8. Виходить, що коефіцієнти шумових складових мають однаковий порядок.

**Таблиця 8**

Зразок гіроскопа	Коефіцієнти шумових складових				
	$B$ , град/с	$K, \frac{\text{град/с}}{\sqrt{с}}$	$N, \frac{\text{град}}{\sqrt{с}}$	$Q$ , град	$R, \frac{\text{град}}{с^2}$
ВОГ	$7 * 10^{-5}$	$5,07 * 10^{-4}$	$7,05 * 10^{-3}$	–	$0,891 * 10^{-8}$
ТХГ	$6,619 * 10^{-5}$	$8,1 * 10^{-4}$	$6,15 * 10^{-3}$	$2,45 * 10^{-3}$	$1,039 * 10^{-8}$
Символ «–» вказує на те, що чисельне значення не визначене					

Апроксимація кривої відхилення Аллана дозволила оцінити кількісний вклад ідентифікованих шумів в каналі вимірювання на достовірність оцінки вимірюваної величини.

## **Висновки**

Складено опис методу варіації Аллана для отримання даних про шумових складових вихідної інформації приладу, що дозволяє проводити розрахунок варіації Аллана і відхилення Аллана за результатами отриманої вихідної інформації з приладу з подальшою апроксимацією узагальненим многочленом.

Графічне призначення для користувача інтерфейсу для відображення результатів обчислень кривої Аллана і оцінок шумових складових вихідного сигналу приладу. Отримано оцінки шумових складових вихідних сигналів вимірників на прикладі зразка навігаційного приладу твердотільного хвильового гіроскопа в режимі датчика кутової швидкості, в результаті яких зроблено висновок про шумове спектрі вимірювальної інформації приладу. Надалі представляє інтерес проводити тестування серійних приладів методом варіації Аллана і порівняти отримані результати з паспортними характеристиками приладів.

## **Список використаної літератури**

1. Орієнтація і навігація рухомих об'єктів: сучасні інформаційні технології / За ред. Б.С. Альошина, К.К. Веремеєнко, А.І. Чорноморського. - М.: ФІЗМАТЛІЗ, 2006. - 424 с.
2. Матвеев, В.В. Основи побудови безплатформеної інерційної навігаційної системи / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. - СПб.: ГНЦ РФ ВАТ «Концерн ЦНДІ Електроприлад», 2009. - 280 с.
3. Бранец, В.Н. Введення в теорію безплатформенної інерційних навігаційних систем / В.М. Бранец - М.: Наука, 1992. - 280 с.
4. Матвеев, В.В. Інерціальні навігаційні системи: Навчальний посібник / В.В. Матвеев. - Вид-во ТулГУ, 2012. - 199 с.
5. Галамай, А.А. Питання реалізації ЦВС алгоритму тарировки датчиків в польоті за інформацією від високоточної ІНС / А.А. Галамай. /

Вісник ЮУрГУ. Серія "Комп'ютерні технології, управління, радіоелектроніка".  
- 2015. - №4. - С. 111-120.

6. Галамай, А.А. Питання забезпечення точності при векторному узгодженні безплатформеної інерційної навігаційної системи з високоточною інерціальною навігаційною системою / А.А. Галамай. // Молодь і майбутнє авіації і космонавтики. - Москва: МАІ, 2016. -С.247-249.

7. Антонова, М.В. Блочно-модульний принцип конструювання безплатформенної інерційних блоків / М.В. Антонова, Д.С. Бородулін, А.А. волинців, Є.Ю. Ковальова, Л.З. Новиков, А. І. Терьошкін, І.І. Жегалін. // Вісник ЮУрГУ. Серія «Комп'ютерна технологія, управління, радіоелектроніка». - 2015. - Т. 15, № 4. - С. 101-110.

8. Єрмаков, В.С. Автоматизація калібрування безплатформеної інерційної навігаційної системи на волоконно-оптичних гіроскопах; / В.С. Єрмаков. - Перм, 2007. - 136 с.

9. Миколаїв, С.Г. Калібрування безплатформенної інерційних навігаційних систем по вихідним сигналам моделі помилок / С.Г. Миколаїв, Ю.В. Івшина. / Науково-технічні відомості СПбДПУ серія "Інформаційні, керуючі та вимірювальні системи". - 2014. - Вип. 4. - С.95-105.

10. Попов, Г.В. Вимірювання параметрів і калібрування мікромеханічних інерціальних вимірювальних блоків / Г.В. Попов, О.А. Перлина. / Авіакосмічного приладобудування. - 2014. - №12. - С.38-47.



## Розділ 4. Застосування метода варіації Аллана для оцінки похибок вібраційного гіроскопа з металевим резонатором

### 4.1. КВГ з металевим резонатором

Тенденція до зниження вартості КВГ призводить до металевих резонаторів. У порівнянні з КВГ на кварцовому резонаторі, він має набагато менш добротність і, як результат, низку точність. Більшість з них вимірюють кутову швидкість, а не кут обертання, використовуючи управління із зворотним зв'язком для демпфування вторинної моди. Розглянемо КВГ, що вимірює кутову швидкість, використовуючи кільцевий (циліндричний) резонатор більш докладно. КВГ, що вимірює кутову швидкість, використовує позиційне збудження і в цьому випадку, як було зазначено вище, пружна хвиля "прив'язана" до електрода збудження. Стояча хвиля на другий резонансний моді коливань, характеризується чотирма пучностями та чотирма вузлами коливань. Це є хвиля (мода) збудження, яка виникає шляхом застосування періодичної напруги  $U=A\cos(\omega_r t)$  з резонансної частотою  $\omega_r$ . Коли резонатор обертається навколо своєї осі симетрії з кутовою швидкістю  $\Omega$ , виникають сили Кориоліза, які збуджують вторинну хвилю, яку називають модою Кориоліза або вимірювальною модою, в напрямку результуючій сили Кориоліза  $F_c$ . Результуюча сила Кориоліза визначається з наступного співвідношення:

$$|\vec{F}_c| = 2 |\vec{V}| \times |\vec{\Omega}| \sin \alpha_{V,\Omega} \quad , \quad (4.1)$$

де – вектор кутової швидкості;  $\alpha_{V,\Omega}$  – кут між векторами  $\vec{V}$  і  $\vec{\Omega}$  ( $90^\circ$ ),  $\vec{V}$  – вектор лінійної швидкості елементів мас резонатора у процесі вібрації,  $|\cdot|$  – позначення модулю вектора.

<b>Кафедра АКСУ</b>				<b>НАУ 19 16 77 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	Суховаров Є.О.			<b>Застосування метода варіації Аллана для оцінки похибок вібраційного гіроскопа з металевим резонатором</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
<b>Керівник</b>	Чиковані В.В.					96	150
<b>Консульт.</b>	Чиковані В.В.				<b>602 6.050201</b> Error! Unknown switch argument.		
<b>Н. контр.</b>	Чиковані В.В.						
<b>Зав. каф.</b>	Тачиніна О.М.						

Таким чином, амплітуда моди Кориоліза, яка збуджується силами Кориоліза пропорційна кутовий швидкості  $\Omega$ . Диференціальні рівняння, що описують поведінку двох мод коливань (мода збудження та мода Кориоліза (вимірювальна мода)) можуть бути представлені наступним чином:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{\omega_x}{Q_x} \dot{x} + \omega_x^2 x &= A \cos(\omega_x t); \\ \ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y} \dot{y} + \omega_y^2 y &= k\Omega\dot{x}; \end{aligned} \quad (4.2)$$

де  $x$  та  $y$  є переміщення по осям  $X$  (мода збудження) та  $Y$  (мода Кориоліза, вимірювальна мода) відповідно;  $\omega_x$  та  $\omega_y$  є власні частоти цих двох мод вібрації;  $Q_x$  та  $Q_y$  є добротності мод коливань вздовж осей  $x$  та  $y$ ;  $A$  є амплітуда сили, що діє уздовж осі  $X$ ;  $k$  є коефіцієнт Брайана, рівний приблизно 0,4;  $\Omega$  є кутова швидкість, що вимірюється.

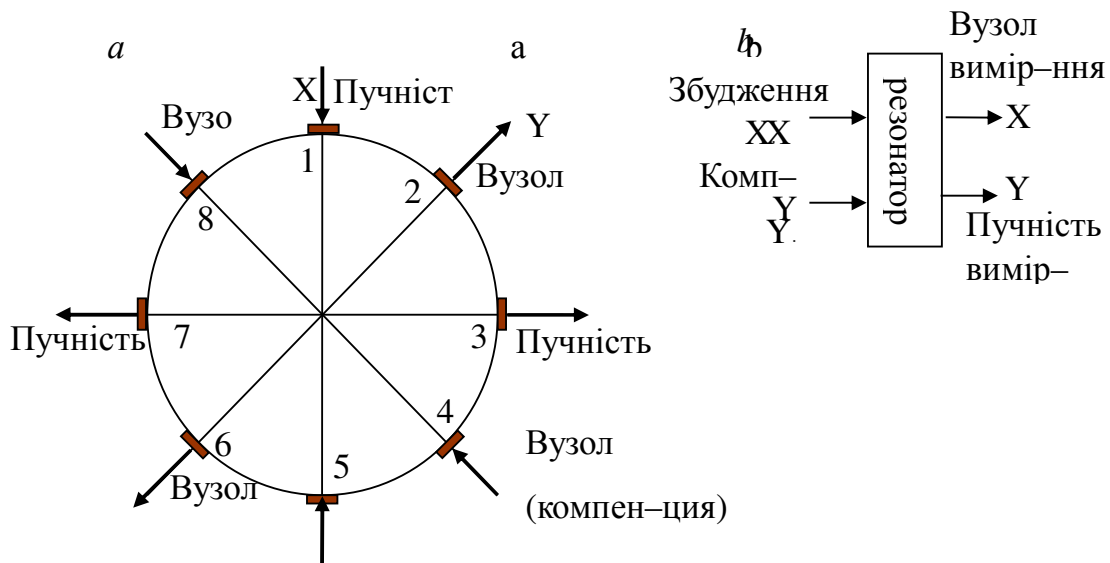


Рис.4.1. Схема розташування електродів в кільцевому (циліндричному) резонаторі.

Діаметрально протилежні електроди (1–5; 2–6; 3–7; 4–8) пов'язані один з одним, так що у них є те ж самі напруги. В результаті є два вихідних сигнали ( $X_{in}$ ,  $Y_{in}$ ) та два вхідних сигнали ( $X_{out}$ ,  $Y_{out}$ ). Це означає, що резонатор можна розглядати як об'єкт управління з двома входами та двома виходами. Амплітуда моди Кориоліза сприймається п'єзоелектричним електродом, що встановлений на вузловій точці хвилі збудження та за допомогою зворотного зв'язку придушується із застосуванням протилежній напруги на один з інших вузлів. Таким чином, амплітуда сигналу зворотного зв'язку, яка компенсує вібрацію вузлів є пропорційною кутовій швидкості  $\Omega$ . Цей метод вимірювання, що використовує компенсаційний сигнал, називається компенсаційний метод вимірювання і часто використовується на практиці не тільки в гіроскопах. Лінійна швидкість  $V$  елементарних мас резонатора є :  $V = \mu dU/dt = V = -\mu A \omega_x \sin(\omega_x t)$ , де  $\mu$  є коефіцієнт пропорційності між прикладеною напругою до електроду та відклику механічних вібрацій. Для того, щоб  $F_c = k\Omega$  було пропорційно  $\Omega$ , параметри  $A$  і  $\omega_x$  повинні бути постійними. Але  $\omega_x$  (резонансна частота резонатора) змінюється від температури, так що цей параметр повинен бути відстежений, а амплітуда механічних вібрацій ( $\mu A$ ) повинна бути стабілізована на задану величину. Так, вісім електродів повинні бути використані для збудження коливань, для розрахунку сигналів управління та виміру кутовий швидкості  $\Omega$ .

Ці електроди розташовані на всіх чотирьох пучностях та чотирьох вузлах стоячій хвилі. Слід зазначити, що всі сигнали, що надходять від резонатора є амплітудо модульовані сигнали. Резонансна частота є несучою частотою (4–6 кГц), а сигнал кутової швидкості  $\Omega$  є модулюючим сигналом. Для того щоб обчислити сигнали управління, в першу чергу повинна здійснюватися демодуляція. Для того щоб застосовувати управляючі сигнали на резонатор, повинна здійснюватися модуляція з використанням резонансної частоти.

Функціональна блок схема системи управління КВГ представлена на рисунк. 4.2.

Система управління працює наступним чином:

### Канал збудження

Сигнал пучності подається на АЦП (рисунок.4.3), а потім на смуговий фільтр для відилена смуги частот навколо резонансної частоти  $\omega_x \pm \omega_\Omega$  та придушення будь-якого шуму поза цього діапазону. Після придушення шумів,

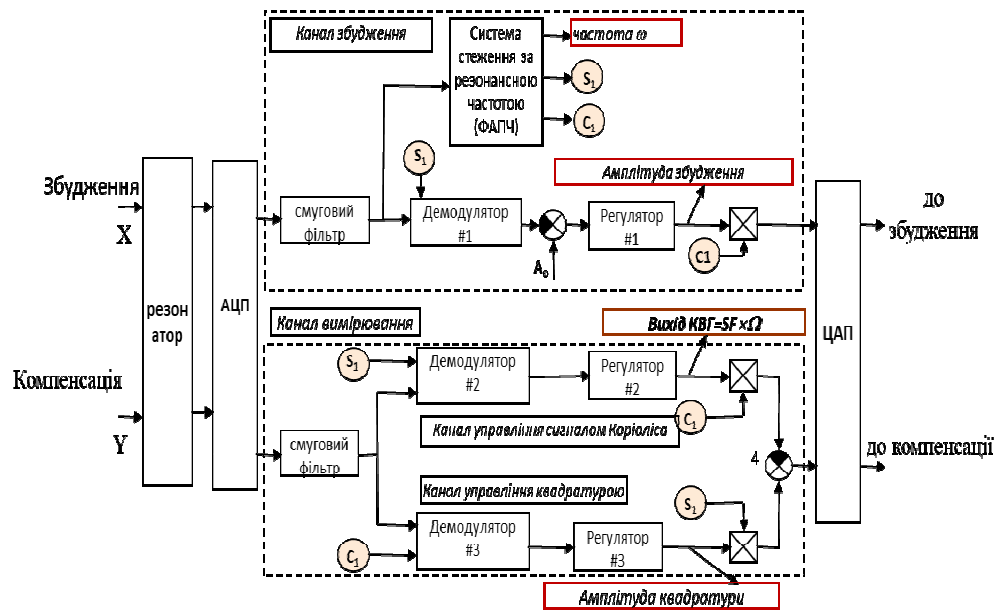


Рисунок.4.2. Функціональна блок схема системи управління хвилею вібраційного гіроскопа з металевим резонатором

сигнал ділиться на дві гілки з різними компонентами, синус і косинус компоненти. Синус компонентна відповідає за стабільність амплітуди збудження, а косинус компонент – за управління фазою.

### Управління амплітудою

Синус компонент сигналу пучності виділяється демодулятором № 1 у вигляді стабільної амплітуди вібрації, яка встановлюється на дискримінаторі. Сигнал похибки, різниця між реальною амплітудою вібрації та бажаною ( $A_0$ ) надається регулятору № 1, який дає сигнал на його виході, так що, щоб дістатися до

нульового сигналу на вході, то є приводить амплітуду коливань до  $A_0$ .

Вихідний сигнал регулятора № 1 є сигнал постійного струму, який має бути знову модульований шляхом множення на косинус компонент опорного сигналу, щоб відправити його на ЦАП, а потім в аналоговому вигляді (напруга) на електрод збудження резонатора.

### Управління фазою (ФАПЧ)

Після смугового пропускання фільтра пучності, друга гілки сигналу пучності подається на демодулятор ФАПЧ (див. рисунок.4.3) та частотомір. Косинус компонент сигналу пучності виділяється демодулятором ФАПЧ, яка пропорційна різниці фаз  $\Delta$  між опорним сигналом  $C_1 = \cos(\omega_x t)$  та сигналом пучності:

$$\Delta = A_0 \sin(\omega_x t + \alpha) \cos(\omega_x t) = A_0 \sin(\omega_x t + \alpha + \omega_x t) + A_0 \sin(\omega_x t + \alpha - \omega_x t) = A_0 \sin(2\omega_x t + \alpha) + A_0 \sin \alpha; \text{ after low pass filter } \Delta = A_0 \sin \alpha \approx A_0 \alpha, \alpha \ll 1; \quad (4.3)$$

Сигнал  $\Delta$  пропорційний різниці фаз як сигнал похибки надається регулятору ФАПЧ, який, після норміровання на дискретний час  $T_0$  та посилення у  $K_\phi$  разів змінює частоту збудження, так, щоб сигнал похибки (тобто різниці фаз) була нульової  $\Delta=0$ . ФАПЧ тримає частоту збудження на резонансній частоті  $\omega_x$ . Із амплітудо– та фазо–частотної характеристики резонатора слідує (див.рисунок.4.3), що коли частота збудження не дорівнює резонансної частоти фаза вихідного сигналу демодулятора ФАПЧ не дорівнює  $90^\circ$ , так що виникає різниця фаз  $\Delta$  яка не дорівнює нулю, а регулятор дає сигнал, пропорційний різниці фаз  $\Delta$ , щоб повернути частоту в резонанс, та занулити різницю фаз  $\Delta=0$ .

Частотомір вимірює період сигналу, наприклад, шляхом підрахунку числа перетинань нульового рівня періодичним сигналом за час  $T$  та обчислює частоту за формулою  $\omega_x = 2\pi N/T$  [1].

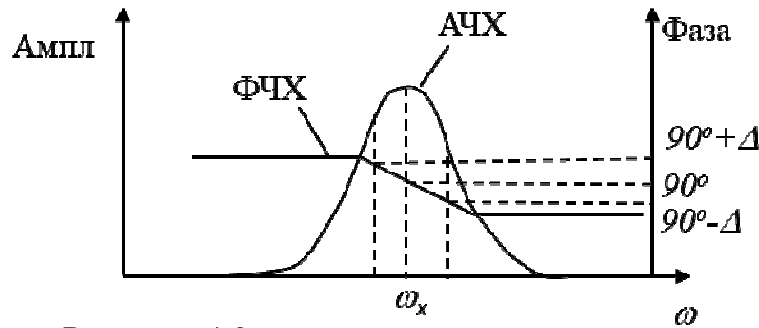
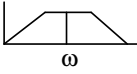
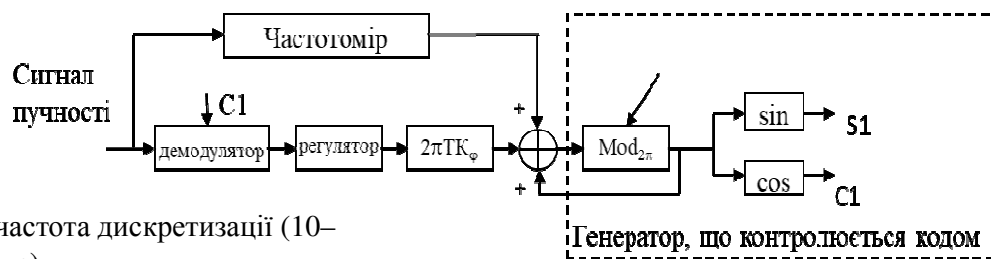


Рисунок. 4.3. АЧХ та ФЧХ резонатора.

ЦАП – цифро–аналоговий перетворювач, АЦП– аналого–цифровий перетворювач;  $A_0$  – бажана амплітуда пучності.

Смуговий фільтр →  є цифровий смуговий фільтр з центральною частотою, рівною резонансній частоті. Він використовується для зниження вхідних шумів і пропускання корисного сигналу.

Система стеження за резонансною частотою є цифровою системою фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з генератором, що управляється напругою (ГУН), реалізованим у програмному забезпеченні. Ця система забезпечує стеження за частотою резонатора, що змінюється та синтезує опорні сигнали  $S_1$ ,  $C_1$ , що використовуються для демодуляції і повторної модуляції сигналів управління. Структурна схема системи стеження за резонансною



$T$  – частота дискретизації (10–20 мкс);

$K_\phi$  – коефіцієнт підсилення

ФАПЧ

Рисунок.4.4. Система фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

частотою представлена на рисунок.4.4.

Демодулятор: він реалізує множення вхідного сигналу на опорний та виконує низько частотну фільтрацію, щоб подавити високі частоти, що виникають після множення, та виділити низько частотну огінаючу (див. рисунок.4.5). Вхідний сигнал є амплітудо модульований сигнал, як показано на рисунок.4.6.



Рис.4.5. Амплітудо модульований сигнал

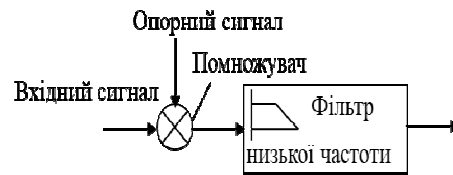


Рис.4.6. Демодулятор

У загальному випадку амплітуда модульованого сигналу можна математично описати таким чином:

$$y(t) = [A + m(t)\sin(\omega_m t + \varphi_m)]\sin(\omega_c t + \varphi_c); t = i\Delta t; i = 1 \dots N, \quad (4.4)$$

де  $\omega_m$  – частота, що модулює;  $\omega_c$  – несуча частота;  $\varphi_m, \varphi_c$  – фази частот, що модулює та несучій частоти, відповідно. У виразі (4.4) наступна нерівність повинна бути дійсною  $\omega_m \ll \omega_c$  та  $m(t) \leq A$ . Співвідношення  $\max(m)/A$  називається індекс модуляції і виражається у відсотках.

У разі КВГ  $A = 0$ , тому що в вузловій точці, де виникає кутова швидкість, сигнал у відсутності кутової швидкості дорівнює нулю. Коли резонатор обертається навколо своєї осі симетрії з кутовою швидкістю  $\Omega_o \sin(\omega_o t + \varphi_o)$ , де  $\Omega_o$  є амплітуда кутової швидкості,  $\omega_o$  є частота зміни кутової швидкості,

$\varphi_o$  є фаза кутової швидкості, сигнал вузла є:

$$y(t) = \Omega_o \sin(\omega_o t + \varphi_o) \sin(\omega_x t); \quad (4.5)$$

тут  $\omega_x$  є резонансна частота вдовж осі X.

Процес демодуляції є те, щоб відокремити низько частотну огінаючу  $\Omega_o \sin(\omega_o t + \varphi_o)$ , тобто кутову швидкість, від високо частотний несучої  $\sin(\omega_x t)$

множенням сигналу  $y(t)$  з несучої частотою, яка є опорним сигналом (нормований сигнал пучності):

$$y(t)\sin(\omega_x t) = \Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega) \sin^2(\omega_x t) = \Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega) [1 - \cos(2\omega_x t)]/2 =$$

$$\Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega)/2 - \Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega) \cos(2\omega_x t)/2 =$$

$$\Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega)/2 - \Omega_o \{ \sin[(2\omega_x + \omega_\Omega)t + \varphi_\Omega] - \sin[(2\omega_x - \omega_\Omega)t - \varphi_\Omega] \}/2; \quad (4.6)$$

Таким чином, перший доданок  $\Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega)/2$  помножене на 2 є огінаюча (для КВГ це кутова швидкість) та зосереджена на низької частоти  $\omega_\Omega$  (як правило  $\omega_\Omega \leq 100$  Гц), два інших доданка зосереджені на подвійний частоті резонансу  $2\omega_x + \omega_\Omega$  та  $2\omega_x - \omega_\Omega$  (як правило  $2\omega_x \approx 10$  кГц). Спектр потужності сигналу  $y(t)\sin(\omega_x t)$  показано на рисунок.4.7.

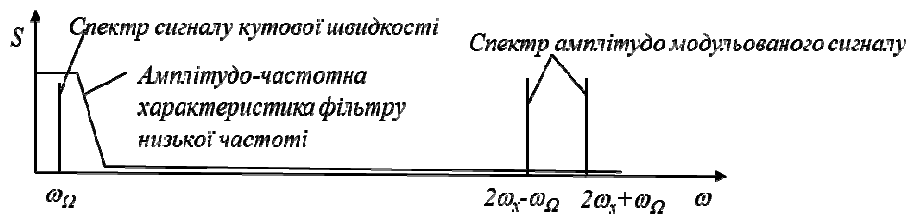


Рисунок.4.7. Спектри модульованого та демодульованого

Коли цей сигнал проходить через фільтр нижніх частот з частотою зріза трохи більше, ніж  $\omega_\Omega$ , на виході цього фільтра тільки огінаюча  $\Omega_o \sin(\omega_\Omega t + \varphi_\Omega)/2$  може бути отримана.

Регулятор: Пропорційно–інтегральний (ПІ) регуляторі використовуються в цей системи управління. Схема ПІ–регулятора в цифровій формі зображений на рисунок.4.8.

$K_p$ ,  $K_i$  є коефіцієнти посилення пропорційного і інтегрального блоків, відповідно. Ці коефіцієнти повинні бути обрані при налаштування системи управління. Ці коефіцієнти визначають смуги пропускання кожного контуру і його точність. Значення цих коефіцієнтів залежать від властивостей об'єкта управління (тобто резонатора).



Цифровий ПІ-регулятор є окремим випадком дуже популярного в техніки пропорційно-інтегральне-диференціальний (ПІД) регулятор, показаний на рисунок. 4.9.

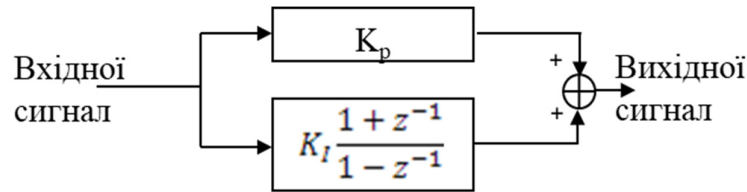


Рис.4.8. Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор.

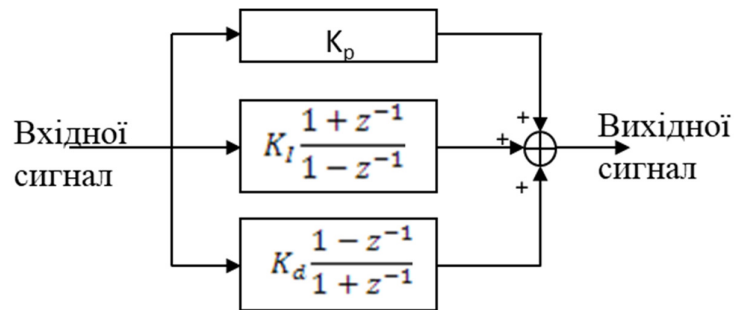


Рис.4.9. Пропорційно-інтегральне-диференціальний (ПІД) регулятор.

## 4.2. Опис роботи системи управління

### Канал вимірювання

Сигнал вузла подається на АЦП, а потім на другий смуговий фільтр для придушення шуму за межами смуги частот  $\omega_x \pm \omega_\Omega$  і ділиться на два підканала, де витягуються синус і косинус компоненти (див. рисунок.4.2):

Синус компонент сигналу вузла (підканал сили Кориоліза); Косинус компонент сигналу вузла (підканал сигналу квадратури);

### Управління сигналом Кориоліза (кутової швидкості)

Демодулятор № 2 витягує синус компонент (кутова швидкість) сигналу вузла. Вихідний сигнал демодулятора # 2 подається на регулятор № 2, який формує сигнал, пропорційний кутової швидкості (вихідної сигнал гіроскопа) і відправляє його на вихідний роз'їм. Той же сигнал повторно модулюється косинус компонентом опорного сигналу  $C_1$  і сумується з квадратурної

компонентою, котра також повторно модулюється синус компонентом  $S_1$  опорного сигналу.

#### Управління сигналом квадратури

Демодулятор №3 витягує косинус (квадратурну) компоненту сигналу вузла. Вихідний сигнал демодулятора №3 подається на регулятор №3, який формує сигнал, пропорційний сигналу квадратури і відправляє його на повторну модуляцію опорного сигналу  $S_1 = \sin(\omega_x t)$ , а потім додає до сигналу управління силою Кориоліза. Сума двох сигналів через ЦАП надається електрод компенсації резонатора, щоб звести до нуля коливання у вузлі.

### 4.3. Конструкція КВГ с металевим резонатором

Один з варіантів конструкції КВГ виготовлений в Україні на основі циліндричного резонатора з металевого сплаву показаний на рисунок. 4.10.



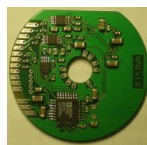
Металеві резонатори



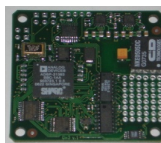
Чутливий елемент КВГ



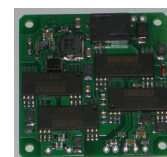
Український цифровий КВГ



Буферна плата



Плата живлення



Цифрова плата управління

Рисунок.4.10. Компоненти Українського цифрового КВГ

### 4.4. Результати тестування та розрахунок віріації Аллана

Для того щоб оцінити точність цього гіроскопа, були проведені його тестування КВГ з металевим резонатором, що представлений на рисунок. 4.10 в статички при постійної температурі. Результати вимірів зміщення нуля

представлені на рисунок. 4.11. По цим даним за допомогою алгоритму, що був описаний в розділі 3 була розрахована варіація Аллана.

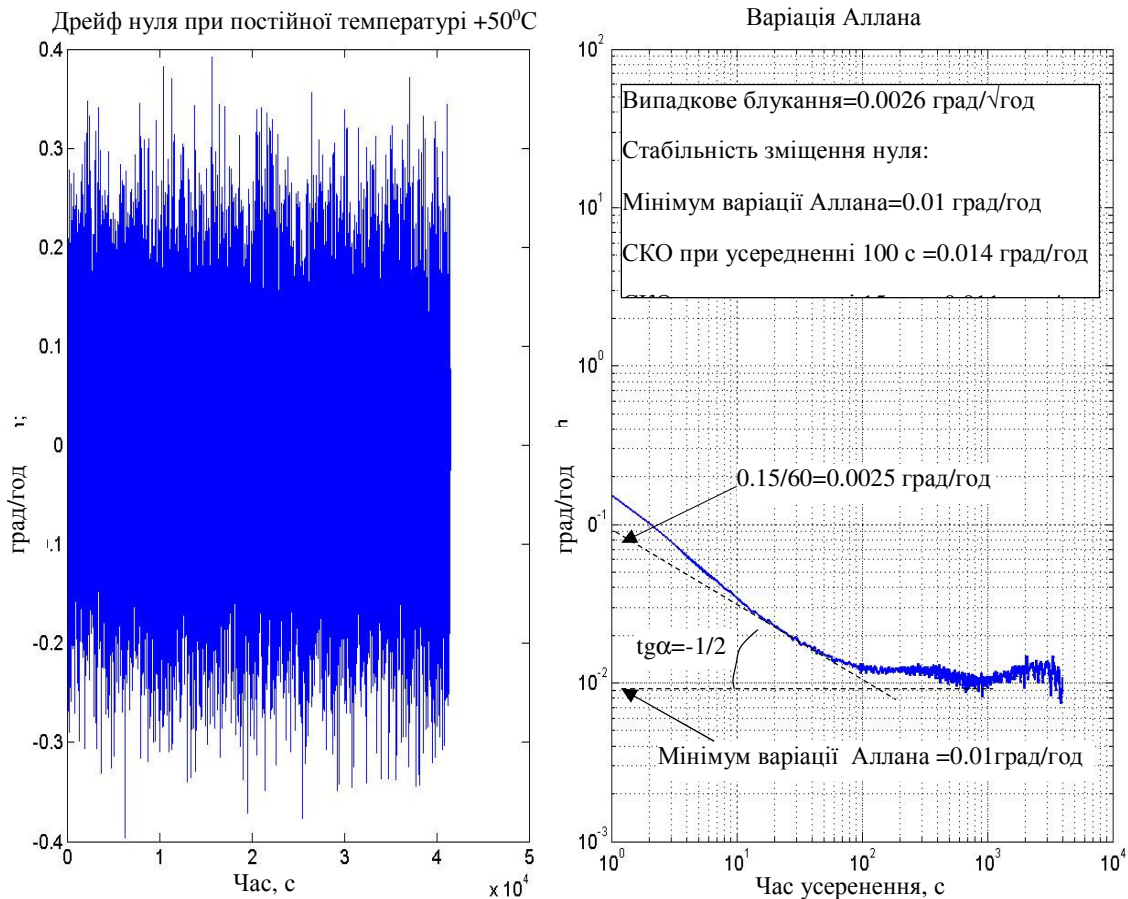


Рисунок. 4.11. Виміри зміщення нуля та його варіації Аллана при постійній температурі 50°C КВГ з металевим циліндричним резонатором діаметром 25 мм

Як видно з графіку, випадкове мірцання становить 0,0026 град /√год, дрейф (нестабільність) зміщення нуля становить 0,01 град/год (мінімум дисперсії Аллана), середньоквадратичний дрейф зміщення при усередненні за 100 с становить 0,014 град/год. Однак, при зростанні часу усереднення до 15 хв. нестабільність зміщення нуля становить 0,011 град/год, а при зростанні часу усереднення до 1 години нестабільність зміщення нуля становить 0,007 град/год.

## Висновки

1. Вібраційний гіроскоп є одним з перспективних та затребуваних гіроскопом на світовому ринку.
2. Мікромеханічний варіант його виконання (МЕМС) є дешевим засобом заміни практично всіх інших видів гіроскопів у категоріях групових точностей, здатних працювати в жорстких умовах навколишнього середовища.
3. Перспективні дослідження в галузі гіроскопічних технологій на основі поверхнево-акустичних хвиль вже сьогодні дозволяють затвердити, що скоро на ринку з'являються дешеві датчики високої віброударної міцності.
4. Метод варіації Аллана дозволяє виділити з дрейфу зміщення нуля важливі компоненти, які характеризують похибки вимірювання кутової швидкості та кута повороту в різних застосуваннях гіроскопа і особливо в автономних навігаційних системах.
5. Дешеві не-МЕМС гіроскопи з металевим резонатором можуть досягати високих точностей і бути одночасно міцними і стійкими до зовнішніх механічних впливів.
6. Точність металевих резонаторів може досягати 0.01 град/год і менше, що дає можливість побудови високоточних навігаційних систем на його основі для різних застосувань.

### **Список використаної літератури**

1. V. V. Chikovani "Basics of manufacturing technologies of the devices for on-board control systems".- Manual (Навчальний посібник), К. НАУ-ДРУК, 2013 – 176с.
2. V.V. Chikovani "Trends of Ukrainian all digital Coriolis vibratory gyroscopes development".- IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), NAU, Kyiv, Ukraine, Oct.14-17, 2014, pp.25-28

## Розділ 5. Вплив вібраційних процесів на екологію навколишнього середовища

Шум – це одна з форм фізичного (хвильового) забруднення навколишнього середовища. Як правило, шум нас дратує: заважає працювати, відпочивати, думати. Негативна дія шуму на життєдіяльність людини відома давно. З того часу, як існують війни, масові бойові вибухи однієї з ворогуючих сторін, барабанний бій викликали у протилежної сторони стресові явища, бажання втекти, врятуватись. Зараз вчені пояснюють, що гучні звуки, шум, стрілянина з гармат, гуркіт танків і літаків і навіть музика на рок–концертах сприймаються не тільки слуховими органами, а й шкірою, серцем, органами дихання. Вони збуджують людину, є причиною виділення в її кров великої кількості гормонів (наприклад, адреналіну), тим самим сприяють виникненню почуття страху і небезпеки. Звичайно після концертів рок–музики слухачі часто сильно збуджуються, стають нервовими, агресивними, улаштовують бійки і погроми в залах. Встановлено, що молодь витримує шум більш інтенсивний, ніж люди віком більше 30–40 років. Проте згодом, як свідчить статистика, усі молоді люди, що надмірно захоплювалися гучною музикою мали ушкодження органів слуху, хвору нервову систему та інші захворювання.

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають у результаті коливального руху частинок у пружних середовищах (твердих, рідких, газоподібних).

Шумове забруднення навколишнього середовища увесь час зростає. Особливо це стосується великих міст. Опитування жителів міст довело, що шум турбує більше 50% опитаних. Причому, в останні десятиліття рівень шуму зріс у 10 – 15 разів.

<b>Кафедра АКСУ</b>				<b>НАУ 19 16 77 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	Суховаров Є.О.			<b>Вплив вібраційних процесів на екологію навколишнього середовища</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
<b>Керівник</b>	Чіковані В.В.					109	149
<b>Консульт.</b>	Чіковані В.В.				<b>602 6.050201</b> Error! Unknown switch argument.		
<b>Н. контр</b>	Чіковані В.В.						
<b>Зав. каф.</b>	Тачиніна О.М.						

Шум – один з видів звуку, який називають «небажаним» звуком. Як відомо з фізики, процес поширення коливального руху в середовищі називається звуковою хвилею, а область середовища, в якій поширюються звукові хвилі звуковим полем. Розрізняють такі види шуму:

- ударний (штамбування, кування);
- механічний (тертя, биття);
- аеродинамічний (в апаратах і трубопроводах при великих швидкостях руху повітря).

Зменшення рівня шуму поліпшує самопочуття людини і підвищує продуктивність праці. З шумом необхідно боротися як на виробництві, так і в побуті. Уміння дотримуватися тиші – показник культури людини і її доброзичливого ставлення до навколишніх. Тиша потрібна людям так само, як сонце і свіже повітря.

Не менш важливе значення для здоров'я і самопочуття людини має вібрація.

Вібрація – це коливання твердих тіл, частин апаратів, машин, устаткування, споруд, що сприймаються організмом людини як струс. Часто вібрації супроводжуються почутим шумом.

Вібрація впливає на:

- центральну нервову систему;
- шлунково–кишковий тракт;
- вестибулярний апарат;
- викликає запаморочення, оніміння кінцівок;
- захворювання суглобів.

Тривалий вплив вібрації викликає фахове захворювання – вібраційну хворобу. Розрізняють загальну і локальну вібрації. Локальна вібрація зумовлена коливаннями інструмента й устаткування, що передаються до окремих частин тіла. При загальній вібрації коливання передаються всьому тілу від механізмів через підлогу, сидіння або робочий майданчик.

Виконання багатьох технологічних операцій пов'язане з впливом вібрації на працівників. Зокрема, постійне вдосконалення механізованих інструментів, що пов'язане із зростаючим числом ударів та обертів, розширення масштабів використання транспорту, сільськогосподарських машин призвели до того, що вібрація на виробництві є одним із найбільш поширених шкідливих факторів.

З фізичної точки зору, вібрація являє собою сукупність коливальних рухів, що повторюються через певні проміжки часу і характеризуються певною частотою коливань, амплітудою та прискоренням.

За способом передачі на тіло людини виробничі вібрації поділяють на загальні й місцеві, або локальні. Вібрації загальні або робочого місця в цілому, це вібрації підлоги або верстатів і різних механізмів ударної дії на транспортних та сільськогосподарських машинах.

Локальні вібрації – це вібрації пневматичних та електричних інструментів, а також виробів, які працівник тримає в руках під час обробки їх на шліфувальних верстатах. Вібрація є загальнобіологічним фактором, що діє на будь-які клітини і тканини.

Вібрація невеликої інтенсивності протягом короткого проміжку часу позитивно діє на організм людини: підвищує обмін речовин, м'язову силу й обмін речовин, знижує втому, прискорює заживлення ран. У зв'язку з цим, вібрацію можна використати і з лікувальною метою.

При тривалій дії вібрації високої інтенсивності в організмі людини виникають патологічні реакції. Характер та ступінь важкості захворювання залежать від амплітуди і частоти вібрації, від індивідуальної чутливості



організму і ряду супровідних факторів: шуму, переохолодження, перенапруження під час роботи. Розрізняють два види вібраційної хвороби: від дії локальної та загальної вібрації. В основі першої лежать зміни, що виникають головним чином у нервовій і серцево-судинній системах та опорно-руховому апараті.

Клінічна картина вібраційної хвороби, що виникає від впливу "локальної" вібрації, поліморфна і має свої особливості залежності від частоти, характеристики вібрації та факторів, що супроводжують вібрацію. Залежно від ступеня вираження клінічної картини, виділяють чотири стадії вібраційної хвороби.

Перша, початкова, перебігає без виражених симптомів. Суб'єктивно відзначаються біль та парестезії у верхніх кінцівках, об'єктивно легкі розлади чутливості на кінчиках пальців, незначне зниження вібраційної чутливості, тенденція до спастичного стану капілярів нігтьового ложа. На цій стадії захворювання ще може спостерігатися зворотний процес

Друга стадія хвороби характеризується помірно вираженим симптомокомплексом. Біль та парестезії більш стійкі, знижується чутливість шкіри на пальцях та всій кисті. Відзначаються також функціональні розлади центральної нервової системи астенічного чи астеноневротичного характеру. Процес зворотний за умови переведення на іншу роботу та проведення курсу лікування.

Третя стадія хвороби характеризується вираженими судинними змінами, що супроводжуються спазмами судин і побілінням пальців. Чутливість знижується за периферичним чи сегментарним типом.

Спостерігаються астенічні та неврастенічні реакції, порушується діяльність серцево-судинної, ендокринної та інших систем організму. Цій стадії властиві стійкі патологічні зміни, які, до того ж, погано виліковуються.

Четверта стадія вібраційної хвороби трапляється дуже рідко. Патологічний процес характеризується сукупністю судинних порушень в результаті ураження вищих відділів центральної нервової системи.

Порушення чутливості мають виражений і поширений характер. За характером перебігу цю стадію відносять до стійких та незворотних станів, що супроводжуються зниженням працездатності, навіть до повної її втрати.

Якщо вібраційна хвороба зумовлена впливом загальної вібрації на організм, то вона має інші клінічні прояви. Насамперед спостерігаються зміни в периферичних нервах і судинах нижніх кінцівок, біль у кінцівках, підвищена втомлюваність, легкі розлади чутливості за периферичним типом, болючість м'язів, послаблення пульсації в артеріях ступні. У початковій стадії захворювання периферичні зміни поєднуються з порушеннями в центральній нервовій системі.

При більш вираженій формі вібраційної хвороби, що викликана впливом загальної вібрації, переважають порушення в центральній нервовій системі та вестибулярному апараті, що перебігають за типом вестибулопатії. Симптомами захворювання є також запаморочення, головний біль, астеничний стан, судинні порушення (ступні й кисті холодні, знижується пульсація).

Серед факторів зовнішнього середовища, які впливають на організм, світло займає одне з перших місць. Воно діє не тільки на орган зору, а й на організм в цілому, впливаючи на різноманітні фізіологічні процеси обміну речовин.

Важливою гігієнічною вимогою до житла є забезпечення його природним і штучним освітленням. Сонячне проміння має велике біологічне та психологічне значення, під його впливом прискорюється ріст тканин, покращується обмін речовин, змінюється хімічний склад крові, поліпшується самопочуття і робота залоз внутрішньої секреції.

Сонячне світло має бактерицидну дію, ультрафіолетове проміння сприяє утворенню в організмі вітаміну Д, попереджуючи розвиток рахіту.

Несприятливі умови освітлення погіршують загальне самопочуття, зменшують фізичну і розумову працездатність. Крім цього, виявивши більшу частоту короткозорості й сколіозів (викривлення хребта) у міських школярів, ніж у сільських, він висловив геніальну здогадку, що це пояснюється тривалішим перебуванням останніх на свіжому повітрі, тобто під відкритим небом, під прямими сонячними променями.

У дітей, які дуже мало часу проводять на свіжому повітрі у світлу пору доби, розвивається ультрафіолетова недостатність, яка передусім проявляється зниженням вмісту в крові неорганічного фосфору, зменшенням сили м'язів. Знижена працездатність м'язів спини, а також м'язів очного яблука, сприяє розвитку сколіозів і короткозорості.

Дослідниками зареєстрована у 13 % таких школярів сколіотична осанка, у 20 % – короткозорість. У листопаді та грудні доречно для компенсації явищ недостатності застосовувати штучне ультрафіолетове опромінення

Для гігієнічної оцінки природної освітленості найчастіше використовують світловий коефіцієнт (СК) – співвідношення між площею застеленої поверхні вікон та площею підлоги.

Застосовують також коефіцієнт природного освітлення (КПО) – відсоткове відношення освітленості даної точки горизонтальної поверхні всередині приміщення до одночасної освітленості під відкритим небом. Рідше використовують кути падіння й отвору та коефіцієнт глибини закладання приміщення.

Кут падіння світлових променів – це кут між горизонтальною поверхнею робочого місця і лінією, яка проведена від цієї поверхні до верхнього краю вікна. Чим вертикальніший напрямок сонячних променів, тим більший кут, відповідно, більша освітленість.

У виробничих умовах припустимі рівні шуму і вібрації регламентуються відповідними нормативними документами.

Зниження впливу шуму і вібрації на організм людини досягається такими методами:

- зменшенням шуму і вібрації у джерелах їхнього утворення;
- ізоляцією джерел шуму і вібрації засобами звуко– і віброізоляції;
- звуко– і вібропоглинання;
- архітектурно–планувальними рішеннями, що передбачають раціональне розміщення технологічного устаткування, машин і механізмів;
- акустичним опрацюванням помешкань; застосуванням засобів індивідуального захисту.

Для боротьби з виробничим шумом слід використовувати такі заходи:

- ізоляція джерел шуму у виробничих приміщеннях шляхом створення перегородок (дерев'яних, цегляних) з перенесенням пульта управління за перегородку, якщо можливо, треба встановити біля них звукоізольовані кабінки для обслуговуючого персоналу;
- встановлення агрегатів, робота яких супроводжується шумом або вібрацією (молоти, штампувальні автомати і ін.) на вібро–ізолюючі матеріали чи на спеціальний фундамент;
- заміна технологічних процесів, які супроводжуються шумом, безшумними;
- розміщення цехів з шумними технологічними процесами на певній відстані від жилих приміщень і обсадити їх зеленими насадженнями. Стіни цехів повинні бути потовщеними, а з внутрішнього боку – облицьовані спеціальними акустичними плитами;
- використання індивідуальних засобів захисту органа слуху (заглушки, вкладиші, навушники, шоломи);

– дотримання допустимих рівнів шуму.

Найбільш раціональними заходами, що виключають чи обмежують несприятливу дію вібрації, є технічні заходи. Перш за все, це конструювання обладнання, що унеможливує передачу вібрації працівникам. Важливим заходом є введення в конструкції механізмів, які знижують чи гасять вібрацію.

Велике значення для попередження вібраційної хвороби мають правильна організація роботи, режим праці. Забороняється праця з обладнанням, що вібрує більше часу, ніж встановлено санітарними нормами. Протягом зміни необхідно робити перерви (окрім обідньої) на 10 хвилин після кожної години роботи.

Вібрація серед всіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією сприяють накопиченню пошкоджень в матеріалах, появі тріщин та руйнуванню. Найчастіше і досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Вібрації викликають також й відмови машин, приладів.

За способом передачі на тіло людини вібрацію поділяють на загальну, яка передається через опорні поверхні на тіло людини, та локальну, котра передається через руки людини. У виробничих умовах часто зустрічаються випадки комбінованого впливу вібрації–загальної та локальної.

Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни називають вібраційною хворобою. Симптоми вібраційної хвороби проявляються у вигляді головного болю, заніміння пальців рук, болю в кистях та передпліччі, виникають судоми, підвищується чутливість до охолодження, з'являється безсоння. При вібраційній хворобі виникають патологічні зміни спинного мозку, серцево–судинної системи, кісткових тканин та суглобів змінюється капілярний кровообіг.

Функціональні зміни, пов'язані з дією вібрації на людину – погіршення зору, зміни реакції вестибулярного апарату, виникнення галюцинацій, швидка втомлюваність. Негативні відчуття від вібрації зникають при прискореннях, що складають 5% прискорення сили ваги, тобто при  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Особливо шкідливі вібрації з частотами, близькими до частот власних коливань тіла людини, більшість котрих знаходиться в межах 6 – 30 Гц.

Резонансні частоти окремих частин тіла наступні:

- очі – 22 – 27 Гц;
- горло – 6 – 12 Гц;
- грудна клітка – 2 – 12 Гц;
- ноги, руки – 2 – 8 Гц;
- голова – 8 – 27 Гц;
- обличчя та щелепи – 4 – 27 Гц;
- пояснична частина хребта – 4 – 14 Гц;
- живіт – 4 – 12 Гц.

Загальну вібрацію за джерелом її виникнення поділяють на:

- транспортну, котра виникає внаслідок руху по дорогах;
- транспортно–технологічну, котра виникає при роботі машин, які виконують технологічні операції в стаціонарному положенні або при переміщенні по спеціально підготовлених частинах виробничих приміщень, виробничих майданчиків;
- технологічну, що впливає на операторів стаціонарних машин або передається на робочі місця, які не мають джерел вібрації.

Вібрації, що впливають на операторів різних машин, поділяються на категорії згідно ГОСТ 12.1. 012–90:

- трактори, автомобілі вантажні, будівельно–дорожні машини, снігоочищувачі;
- екскаватори, крани промислові та будівельні, самохідні бурильні установки, шляхові машини, бетоноукладачі.

Підлоговий виробничий транспорт, верстати метало та деревообробні, ковальсько–пресове обладнання, ливарні машини, електричні машини, насосні агрегати та вентилятори; бурильні вишки та установки, бурові верстати, обладнання промисловості будматеріалів .

Гігієнічні характеристики та нормування вібрацій. Гігієнічне нормування вібрацій забезпечує віробезпеку умов праці. Дія вібрації на організм людини визначається наступними характеристиками: інтенсивністю, спектральним складом, тривалістю впливу, напрямком дії.

Показниками інтенсивності є середньоквадратичні або амплітудні значення віброприскорення, віброшвидкості або віброзміщення, виміряні на робочому місці. Для оцінки інтенсивності вібрації поряд з розмірними величинами використовується логарифмічна децибельна шкала. Це пов'язано з широким діапазоном зміни параметрів, при котрих вимірювання їх лінійною шкалою стає практично неможливим.

Для гармонійної вібрації з частотою  $f$  логарифмічні рівні віброзміщення  $L_u$  та віброприскорення  $L_a$  визначаються через логарифмічний рівень віброшвидкості  $L_v$ :

$$L_a = L_v + 20 \lg f - 60;$$

$$L_u = L_v - 20 \lg f + 60.$$

Для стандартних порогових значень прийняті наступні величини параметрів вібрації:

– віброзміщення  $u_0 = 8 \cdot 10^{-12}$  м;

– віброшвидкості  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с;

– віброприскорення  $a_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ .

Зі швидкістю  $v_0$  коливається поверхня, що випромінює звукову енергію на порозі чутності ( $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ ).

Гігієнічну оцінку вібрації, що діє на людину у виробничих умовах, згідно з ГОСТ 12.1. 012–90 здійснюють за одним з наступних методів:

- частотним (спектральним) аналізом нормованого параметра;
- інтегральною оцінкою за частотою нормованого параметра;
- дозою вібрації.

Гігієнічною характеристикою вібрації є нормовані параметри, дібрані в залежності від застосовуваного методу її гігієнічної оцінки. При частотному (спектральному) аналізі нормованими параметрами є середні квадратичні значення віброшвидкості  $v$ , їх логарифмічні рівні  $L$  або віброприскорення  $a$  для локальної вібрації в октавних смугах, а для загальної вібрації – в октавних або 1/3 октавних смугах частот.

**Захист від вібрацій.** Загальні методи боротьби з вібрацією базуються на аналізі рівнянь, котрі описують коливання машин у виробничих умовах і класифікуються наступним чином:

- зниження вібрацій в джерелі виникнення шляхом зниження або усунення збуджувальних сил;
- відлагодження від резонансних режимів раціональним вибором приведеної маси або жорсткості системи, котра коливається;
- вібродемпферування – зниження вібрацій за рахунок сили тертя демпферного пристрою, тобто переведення коливної енергії в тепло;
- динамічне гасіння – введення в коливну систему додаткових мас або збільшення жорсткості системи;



– віброізоляція – введення в коливну систему додаткового пружного зв'язку, з метою послаблення передавання вібрацій, суміжному елементу конструкції або робочому місцю;

– використання індивідуальних засобів захисту.

Зниження вібрації в джерелі її виникнення досягається шляхом зменшення сили, яка викликає коливання. Тому ще на стадії проектування машин та механічних пристроїв потрібно вибирати кінематичні схеми, і котрих динамічні процеси, викликані ударами та прискореннями, були б виключені або знижені. Зниження вібрації може бути досягнуте врівноваженням мас, зміною маси або жорсткості, зменшенням технологічних допусків при виготовленні і складанні, застосуванням матеріалів з великим внутрішнім тертям. Велике значення має підвищення точності обробки та зниження шорсткості поверхонь, що труться.

Відлагодження від режиму резонансу. Для послаблення вібрацій істотне значення має запобігання резонансним режимам роботи з метою виключення резонансу з частотою змушувальної сили. Власні частоти окремих конструктивних елементів визначаються розрахунковим методом за відомими значеннями маси та жорсткості або ж експериментальне на стендах.

Резонансні режими при роботі технологічного обладнання усуваються двома шляхами: зміною характеристик системи (маси або жорсткості) або встановленням іншого режиму роботи (відлагодження резонансного значення кутової частоти змушувальної сили).

**Вібродемпферування.** Цей метод зниження вібрацій реалізується шляхом перетворення енергії механічних коливань коливної системи в теплову енергію. Збільшення витрат енергії в системі здійснюється за рахунок використання в якості конструктивних матеріалів з великим внутрішнім тертям: пластмас, металогуми, сплавів марганцю та міді, нікелетитанових сплавів,

нанесення на вібруючі поверхні шару пружнов'язких матеріалів, котрі мають великі втрати на внутрішнє тертя.

Найбільший ефект при використанні вібродемпферних покриттів досягається в області резонансних частот, оскільки при резонансі значення впливу сил тертя на зменшення амплітуди зростає.

Найбільший ефект вібродемпферні покриття дають за умови, ще протяжність вібродемпферного шару співрозмірна з довжиною хвилі.

**Дія шуму на організм людини.** Негативний вплив шуму на продуктивність праці та здоров'я людини загальновідомий. Під час роботи в шумних умовах продуктивність ручної праці може знизитись до 60%, а кількість помилок, що трапляються при розрахунках, зростає більше, ніж на 50%. При тривалій роботі в шумних умовах перш за все уражаються нервова та серцево-судинна системи та органи травлення. Зменшується виділення шлункового соку та його кислотність, що сприяє захворюванню гастритом. Необхідність кричати при спілкуванні у виробничих умовах негативно впливає на психіку людини.

Вплив шуму на організм людини індивідуальний. У деяких людей погіршення слуху настає через декілька місяців, а у інших воно не настає через декілька років роботи в шумі. Встановлено, що для 30% людей шум є причиною передчасного старіння.

**Методи та засоби колективного та індивідуального захисту від шуму.** Боротьба з шумом в джерелі його виникнення. Це найбільш дієвий спосіб боротьби з шумом. Створюються мало шумні механічні передачі, розроблено способи зниження шуму в підшипникових вузлах, вентиляторах.

Зниження шуму звукопоглинанням та звукоізоляцією. Об'єкт, котрий випромінює шум, розташовують у кожусі, внутрішні стінки якого

покриваються звукопоглинальним матеріалом. Кожух повинен мати достатню звукопоглинальну здатність, не заважати обслуговуванню обладнання під час роботи, не ускладнювати його обслуговування, не псувати інтер'єр цеху. Різновидом цього методу є кабіна, в котрій розташовується найбільш шумний об'єкт і в котрій працює робітник. Кабіна зсередини вкрита звукопоглинальним матеріалом, щоб зменшити рівень шуму всередині кабіни, а не лише ізолювати джерело шуму від решти виробничого приміщення.

Зниження шуму звукоізоляцією. Суть цього методу полягає тому, що шумовипромінювальний об'єкт або декілька найбільш шумних об'єктів розташовуються окремо, ізолювано від основного, менш шумного приміщення звукоізолювальною стіною або перегородкою. Звукоізоляція також досягається шляхом розташування найбільш шумного об'єкта в окремій кабіні. При цьому в ізолюваному приміщенні в кабіні рівень шуму не зменшиться, але шум впливатиме на менше число людей.

Звукоізоляція досягається також шляхом розташування оператора в спеціальній кабіні, звідки він спостерігає та керує технологічним процесом. Звукоізоляційний ефект забезпечується також встановленням екранів та ковпаків. Вони захищають робоче місце і людину від безпосереднього впливу прямого звуку, однак не знижують шум в приміщенні.

Зниження шуму акустичною обробкою приміщення. Акустична обробка приміщення передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинальним матеріалом. Внаслідок цього знижується інтенсивність відбитих звукових хвиль. Додатково до стелі можуть підвішуватись звукопоглинальні щити, конуси, куби, встановлюватись резонаторні екрани, тобто штучні поглиначі.

Штучні поглиначі можуть застосовуватись окремо або в поєднанні з личкуванням стелі та стін. Ефективність акустичної обробки приміщень

залежить від звукопоглинальних властивостей застосовуваних матеріалів та конструкцій, особливостей їх розташування, об'єму приміщення, його геометрії, місць розташування джерел шуму. Ефект акустичної обробки більший в низьких приміщеннях (де висота стелі не перевищує 6 м) витягнутої форми. Акустична обробка дозволяє знизити шум на 8 дБА.

Заходи щодо зниження шуму слід передбачати на стадії проектування промислових об'єктів та обладнання. Особливу увагу слід звертати на винесення шумного обладнання в окреме приміщення, що дозволяє зменшити число працівників в умовах підвищеного рівня шуму та здійснити заходи щодо зниження шуму з мінімальними витратами коштів, обладнання та матеріалів. Зниження шуму можна досягти лише шляхом знешумлення всього обладнання з високим рівнем шуму.

Роботу щодо знешумлення діючого виробничого обладнання в приміщенні розпочинають зі складання шумових карт та спектрів шуму, обладнання і виробничих приміщень, на підставі котрих виносяться рішення щодо напрямку роботи.

Нормування шумів. В Україні і в міжнародній організації зі стандартизації застосовується принцип нормування шуму на основі граничних спектрів (граничне допустимих рівнів звукового тиску) в октавних смугах частот.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ГОСТ 12.1.003–86. В ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів.

В нормах передбачаються диференційовані вимоги до допустимих рівнів шуму в приміщеннях різного призначення в залежності від характеру праці в них. Шум вважається допустимим, якщо вимірювані рівні звукового тиску у

всіх октавних смугах частот нормованого діапазону (63–8000 Гц будуть нижчі, ніж значення, котрі визначаються граничним спектром.

Використовується також принцип нормування, котрий базується на регламентуванні рівня звуку в дБА, котрий вимірюється при ввімкненні коректованої частотної характеристики А шумоміра. В цьому випадку здійснюється інтегральна оцінка всього шуму, на відміну від спектральної.

Нормування рівня звуку в дБА суттєво скорочує об'єм вимірювань і спрощує обробку результатів. Однак цей принцип не дозволяє визначити частотну характеристику необхідного шумоглушіння у випадку перевищення норми. В той же час саме ці дані необхідні при проектуванні заходів щодо зниження шуму.

Нормування шуму за рівнями звуку в дБА та за граничними спектрами застосовуються для оцінки постійного шуму. Для оцінки непостійних шумів використовується еквівалентний рівень, котрий рівний рівню постійного звуку, широкосмугового, не імпульсного шуму, котрий справляє такий самий вплив на людину, як і даний непостійний шум.

Нормованою характеристикою постійного шуму на робочих місцях є рівні звукового тиску L<sub>B</sub>, дБ, в октавних смугах із середньо–геометричними частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

Шумове, вібраційне та електромагнітне забруднення міст. Для мешканців міста шум – справа звичайна. Досить часто людина не замислюється над його протиприродністю. В будь–якому регіоні міста шумить автотранспорт, гуркоче трамвай, з певним шумом працює підприємство, поблизу злітають з аеродрому літаки. В квартирах гудять холодильники і пральні машини, в під'їздах – ліфти. Цей перелік можна продовжити. Якщо шуму так багато в нашому житті, може виявитися, що він не шкідливий. Однак за своїм впливом на організм людини він більше шкідливий, ніж хімічне забруднення.

За останні 30 років у великих містах шум збільшився на 12–15 дБ, а суб'єктивна гучність зросла в 3–4 рази. Шум знизив продуктивність праці на 15–20%, суттєво підвищив ріст захворюваності. Експерти вважають, що в великих містах шум скорочує життя людини на 8–12 років.

Частота захворювань серцево–судинної системи у людей, які живуть у зашумлених районах, у кілька разів вища, а ішемічна хвороба серця у них трапляється утричі частіше. Зростає також: загальна захворюваність, особливо вражає вплив шуму на міських жителів. Якщо на 100 тисяч сільських мешканців припадає 20–30 тих, хто погано чує, то в містах ця цифра виростає в 8 разів.

За даними статистики, жителі великих міст втрачають гостроту слуху з 30 років (в нормі – в 2 рази пізніше). Під впливом шуму погіршується сон та сприйнятливність до навчання. Діти стають більш агресивними та вередливими. І позначення комплексного впливу шуму на людину медики ввели термін – "шумова хвороба". Симптомами цієї хвороби є головний біль, нудота, дратівливість, які досить часто супроводжуються тимчасовим зниженням слуху.

До шумової хвороби схильні більшість мешканців великих міст, які постійно отримують шумові навантаження. Наприклад, нормативні рівні звуку в дБ для мешканців житлових кварталів повинні становити 55 вдень і 45 вночі. Однак різні джерела техногенного шуму вносять вагомий внесок у звукове середовище міста, у сучасних міських районах зі значним рухом транспорту рівень шуму близький до небезпечної межі в 80 дБ.

Шум діє на організм людини не тільки прямо й опосередковано. Шум має й інші можливості впливу. Так, у міських умовах тривалість життя дерев коротша, ніж у сільській місцевості. Головною причиною цього є вплив інтенсивного шуму. При дії шуму в 100 дБ рослини виживають 10 днів. При цьому швидко гинуть квіти і уповільнюється ріст рослин.

Отже, шум шкідливий, але чи можна зменшити його вплив на живі організми, включаючи людину. Виявляється, можливо, і таких заходів багато. Насамперед, необхідно суворо дотримуватись чинних нормативів. І сьогодні на вулицях великих міст шум не спускається нижче 80 дБ. І для того щоб зменшити цей рівень, докладаються значні зусилля, наперед, з удосконалення самої техніки. Конструктори працюють над малошумними двигунами й транспортними засобами, житлові забудови віддаляють від вуличних магістралей, останні відокремлюють від будинків бетонними екранами, поліпшують покриття.

Ефективним заходом боротьби з шумом в містах є озеленення. Дерева, які посаджені близько одне від одного, оточені густими кущами, знижують рівень техногенного шуму і покращують міське середовище.

До негативних фізичних чинників міста належить також вібрація. Джерелами вібрації в містах є: рейковий транспорт, автомобільний транспорт, будівельна техніка, промислові установки.

### **Висновок**

Зазвичай вібрація розповсюджується від її джерела на відстань до 100 м. Найбільш потужне джерело вібрації – залізничний транспорт. Коливання ґрунту поблизу залізниці перевищує землетрус силою 6–7 балів. В метро інтенсивна вібрація розповсюджується на 50–70 м. Неприятливо впливають на організм людини і електромагнітні випромінювання промислової частоти (50 герц) та частот радіохвильового діапазону.

В помешканнях електромагнітні поля створюють: радіоапаратура, телевізори, холодильники тощо, що становить певну небезпеку. Якщо поруч знаходиться постійне джерело електромагнітного випромінювання, яке працює на аналогічній (чи є кратною) частоті, що може призвести до збільшення або зменшення нормальної частоти роботи людського органа, то наслідком цього

можуть бути головний біль, порушення сну, перевтома, навіть загроза виникнення стенокардії. Найбільш небезпечним випромінювання є тоді, коли людина (а особливо дитина) спить.

### Список використаної літератури

1. ВР України Закон «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII
2. ВР України Закон «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII
3. Вплив факторів навколишнього середовища  
[www.ecology.zt.gov.ua/vplyv\\_factoriv.23.01.2019.htm](http://www.ecology.zt.gov.ua/vplyv_factoriv.23.01.2019.htm)
4. Захист від вібрації: Навчальний посібник для самостійного вивчення і до практичних занять для студентів / С.Г.Капіна. - Казань: Изд-во Казанського держ. Архітект. - строіт.ун-та, 2012. - 133 с.
5. Колосов Ю.В., Барановський В.В. Захист від вібрацій і шуму на производ- стве. Навчальний посібник. - СПб: СПбГУ ІТМО, 2011. - 38 с.
6. Безпека життєдіяльності, навчальний посібник. О.А. Міщенко, В.П. Тищенко, 2014 рік.
7. Безпека життєдіяльності. Підручник для студентів середніх професійних навчальних закладів / С.В.Белов, В.А.Девісілов, А.Ф.Козьяков і ін. За заг. ред. С.В.Белова.- 6-е видання, стереотипне - М.: Вища школа, 2008.- 423 с.
8. 14. Б.С. Мاستрюков Безпека в надзвичайних ситуаціях. - Изд. 5 е, перераб М.: Академія, 2008.- 334 с.: іл.
9. Барановський О. М. Зрівноважування і віброзахист механізмів: курс лекцій / А. М. Барановський. - Новосибірськ: НГавт. 2006. - 131 с.
10. Екологія і безпека життєдіяльності / Д. А. Кривошеїн, Л. А. Муравей та ін. - М.: Юніті-Дана, 2000. - 447 с.
11. Растрюгін Л. А. Сучасні принципи управління складними об'єктами / Л. А. Растрюгін. - М.: Сов. Радіо, 1980. - 232 с.



12.Гусєв В. Н., Сєлїванов С.Є., Макаренко В. Н., Токарев В. І. Матеріали  
Всеукраїнської науково-практичної конференції «Безпека праці: освіта,  
наука, практика », 20 листопада 2014 р НУЦЗУ. - Харків. - С. 39-41.

## Розділ 6. Охорона праці

Кожна людина, кожний індивід для забезпечення своїх життєво необхідних потреб здійснює певний вид трудової діяльності. Така діяльність людини супроводжується потенційною небезпекою, може призводити до травм, захворювань. Погіршення самопочуття, інших негативних наслідків. Тому для мінімізації таких негативних явищ в процесі трудової активності людини розробляються і закріплюються державою методологічні основи, правові бази охорони праці трудящих. Проблема захищеності працюючого населення; організації охорони праці на підприємстві, в установі, організації виступила потужним стимулом для написання роботи, саме в цьому полягає актуальність теми дипломної роботи.

Загальними цілями моєї науково–дослідницької роботи є:

- Ознайомлення з поняттям і суттю “Охорона праці” для формування загальної поняттєвої бази.
- Визначення методів і засобів створення безпечних умов праці з урахуванням специфічних особливостей виробництв запрофілем спеціальностей;
- Професійно–орієнтуватись в питаннях організації виробничого процесу, що відповідає всім нормам і правилам безпеки.

Методологічною основою роботи є науковий аналіз умов праці, технологічних процесів, трудових операцій, організації виробництва з метою поглиблення знань в сфері охорони праці, реальній обгрунтованій оцінці охорони праці на підприємстві, в установі та організації в нашій державі.

<b>Кафедра АКСУ</b>				<b>НАУ 19 16 77 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	<b>Суховаров Є.О.</b>			<b>Охорона праці</b>	<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркшів</b>
<b>Керівник</b>	<b>Чіковані Р.Р.</b>					<b>128</b>	<b>149</b>
<b>Консульт.</b>	<b>Чіковані В.В.</b>				<b>602 6.050201</b> Error! Unknown switch argument.		
<b>Н. контр.</b>	<b>Чіковані В.В.</b>						
<b>Зав. каф.</b>	<b>Тачиніна О.М.</b>						

## 6.1. Поняття охорони праці

Поняття охорони праці – система збереження життя і здоров'я працівників в процесі трудової діяльності, що включає в себе правові, соціально–економічні, організаційно–технічні, санітарно–гігієнічні, лікувально–профілактичні, реабілітаційні заходи ».

Під іншими заходами слід розуміти заходи, спрямовані на виконання вимог пожежної безпеки, промислової безпеки. В ході трудової діяльності працівників.

Необхідно відзначити, що охорону праці не можна ототожнювати з технікою безпеки, виробничої санітарією, гігієною праці, так як вони є елементами охорони праці, її складовими частинами.

Безпека – це відсутність неприпустимого ризику, пов'язаного з можливістю нанесення збитку.

Безпечні умови праці – це умови праці, при яких вплив на працюючих шкідливих або небезпечних виробничих факторів виключено, або рівні їх впливу не перевищують встановлені нормативи.

Умови праці – сукупність факторів виробничого середовища і трудового процесу, що впливають на працездатність і здоров'я працівника.

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на працівника може привести до його захворювання.

Небезпечний виробничий фактор – продуктивний фактор, вплив якого на працівника може привести до його травми.

### **Нормативно–правові акти з охорони праці.**

В Україні діє система нормативно–правових актів, що містять державні нормативні вимоги охорони праці, яка складається з міжгалузевих і галузевих правил і типових інструкцій з охорони праці, правил та інструкцій з безпеки, гігієнічних нормативів і державних стандартів безпеки праці.

В Україні прийнято ряд нормативно–правових актів, які регулюють порядок опрацювання, прийняття, перегляду та скасування нормативних актів про охорону праці (далі — НПАОП), принципи їх прийняття та побудови.

Нормотворчий процес прийняття НПАОП має плановий характер, оскільки здійснюється на основі перспективного (п'ятирічного) та поточного (річного) зведених планів. Зведені плани складаються шляхом узагальнення галузевих планів нормотворчої діяльності, що затверджуються міністерствами, пропозицій зацікавлених організацій, результатів перевірки нормативних актів на відповідність чинному законодавству, рівню розвитку науки і техніки. На підставі зведеного та галузевих планів формуються відповідні розділи з питань нормотворчої діяльності у національній та галузевих програмах поліпшення безпеки, гігієни праці та виробничого середовища.

Процес опрацювання та прийняття НПАОП базується на засадах науковості, що передбачає врахування досягнень науки (у тому числі міжнародного досвіду) та залучення до нормотворчого процесу спеціальних науково–дослідних установ та організацій. З цією метою створена мережа головних і базових організацій. На Національний науково–дослідний інститут охорони праці покладено функції головної організації України, яка координує роботу у цьому напрямі, надає методичну допомогу фахівцям базових організацій, опрацьовує проекти НПАОП. Базові та головні організації створюються у більшості галузей економіки згідно з рішеннями міністерств, відомств, концернів, корпорацій та інших об'єднань підприємств. До розробки проекту нормативного акта можуть залучатися окремі організації або творчі колективи, групи фахівців. З метою профілактики нещасних випадків Фонд соціального страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних

захворювань України має право брати участь у розробленні законодавчих та інших нормативних актів про охорону праці.

Прийняття НПАОП має комплексний характер, оскільки при опрацюванні враховуються різнобічні інтереси зацікавлених суб'єктів, охоплюється широкий спектр регульованих питань. Одночасно, з прийняттям проекту НПАОП розглядаються і інші взаємопов'язані нормативні акти. Розробники зобов'язані одночасно підготувати обґрунтовані пропозиції про їх перегляд, зміну чи скасування.

#### **Роботодавець зобов'язаний:**

- Забезпечити безпеку працівників при експлуатації обладнання та здійснення технічних процесів.
- Забезпечити застосування засобів індивідуального захисту і колективного захисту.
- Забезпечити відповідність вимогам охорони праці на кожному робочому місці.
- Забезпечити режим праці і відпочинку.
- Проведення інструктажу з охорони праці.
- Перевірку знань вимог охорони праці.
- Забезпечити організацію контролю над станом умов праці на робочих місцях, а також за правильністю застосування засобів індивідуального та колективного захисту.
- Забезпечити своєчасне розслідування нещасних випадків та оформлення документації по розслідуванню.
- Забезпечити проведення за рахунок коштів організації обов'язкових попередніх та періодичних оглядів.
- У свою чергу працівник також зобов'язаний виконувати вимоги з охорони праці.

#### **Обов'язки працівника:**

- Дотримуватися вимог з охорони праці;
- Правильно застосовувати засоби індивідуального захисту;
- Проходити навчання, інструктажі та перевірку знань вимог охорони праці;
- негайно сповіщати свого керівника робіт про будь-якій ситуації, яка загрожує життю чи здоров'ю людей;
- Проходити попередні медогляди.
- Всі працівники підприємства, в т.ч. і її керівник зобов'язані проходити навчання охорони праці та перевірку знань вимог охорони праці в порядку встановленому урядом РФ.

Особи, винні в порушенні вимог охорони праці, невиконання зобов'язань по охороні праці, передбачених договорами, несуть відповідальність.

Залежно від характеру порушення і наслідків передбачені три форми відповідальності.

Дисциплінарна відповідальність – зауваження, догана, сувора догана, звільнення. Можливо позбавлення премії.

Адміністративна відповідальність – тягне за собою накладення штрафу в розмірі до ста неоподатковуваних мінімумів доходів громадян. Штрафи мають право накладати посадові особи державного нагляду і контролю з охорони праці.

Кримінальна – визначається судом. Порушення правил техніки безпеки або інших правил охорони праці, здійснене особою, на якому лежали обов'язки з дотримання цих правил. Якщо це спричинило по необережності заподіяння тяжкого або середньої тяжкості шкоди здоров'ю людини, то карається штрафом в розмірі від двохсот до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян або в розмірі заробітної плати або іншого доходу засудженого за період від двох до п'яти місяців, або виправними роботами на строк до двох років, позбавленням волі на строк до двох років.

Те саме діяння, якщо воно спричинило смерть людини, карається позбавленням волі на строк до п'яти років.

У деяких випадках можлива і матеріальна відповідальність, яка має два види:

матеріальна відповідальність працівника за заподіяну ним шкоду підприємству (роботодавцю);

матеріальна відповідальність підприємства (роботодавця) перед працівником за завдану йому шкоду на роботі.

У випадках, якщо діяльність організації здійснюється з небезпечними для життя і здоров'я працівників порушеннями вимог охорони праці, зазначена діяльність можуть бути припинені відповідно до приписів керівників.

Умови праці визначаються технологією виробництва, його організацією і трудовим процесом, з одного боку, і навколишнього робочого санітарно-гігієнічної обстановкою, з іншого. До санітарно-гігієнічним умовам праці відносяться метеорологічні умови і фактори, ступінь забруднення повітря парами, пилом, газами, а також шуми і вібрації.

Організувати контроль за дотриманням повітря робочої зони відповідно до вимог ГОСТу 121005 - 88.

Утримувати промислові і допоміжні будівлі і споруди, територію і агрегати відповідно до вимог «Правил охорони праці» та санітарних норм і забезпечити культуру виробництва.

Забезпечити організацію та проведення навчання, стажування робітників і фахівців з подальшою перевіркою знань правил інструкцій з охорони праці.

Забезпечити безпечні умови ведення робіт на всіх фазах виробництва, не допускати до експлуатації машини, механізми та обладнання, які не відповідають вимогам охорони праці, забезпечити суворе дотримання

посадовими особами технологічної дисципліни і графіків планово-попереджувальних ремонтів.

Систематично оновлювати і поповнювати навчальні посібники, засоби агітації і пропаганди для кабінету охорони праці.

Своєчасно видавати працівникам спецодяг, спеціальне взуття та захисні пристосування належної якості, кількості і розмірів відповідно до норм.

Контролювати справність і обов'язкове носіння спецодягу, спецвзуття та інших засобів індивідуального захисту.

Мати у всіх підрозділах і цехах аптечки з необхідною кількістю медикаментів та перев'язувальних засобів за встановленою нормою на одного працюючого.

Дотримуватися трудового обов'язку в частині умов праці жінок і підлітків.

Забезпечити під час вступу на роботу проведення попередніх, а так же, періодичних медичних оглядів працівників.

Адміністрація щоквартально проводить аналіз захворюваності, медичного обслуговування, виробничого травматизму та умов праці.

Одним з найважливіших напрямків охорони праці на підприємстві є забезпечення працівників інструкціями з охорони праці. Дана робота здійснюється відповідно до «Методичних вказівок по розробці правил та інструкцій з охорони праці».

Інструкція з охорони праці - нормативний акт, що встановлює вимоги з охорони праці при виконанні робіт у виробничих приміщеннях і в інших місцях, де виробляються ці роботи або виконуються службові обов'язки.

Інструкції з охорони праці можуть бути типові (галузеві) для працівників підприємств, ділянок і конкретного робочого місця. Інструкції з охорони праці



розробляються на основі міжгалузевих і галузевих правил з охорони праці та не повинні їм суперечити.

Затверджені інструкції для працівників, враховуються службою охорони праці підприємства в журналі обліку. Нагляд і контроль над дотриманням правил та інструкцій з охорони праці здійснюється федеральними органами нагляду.

Інструкції для працівників за професіями та на окремі види робіт розробляються відповідно до затвердженого роботодавцем переліком, який складається за участю керівників підрозділів, служб головних спеціалістів та ін. Розробка інструкцій для працівників здійснюється на основі наказу роботодавця. Інструкції для працівників розробляються керівниками підрозділів (цехів, відділів і д.)

Служба охорони праці організації здійснює контроль над своєчасною розробкою і переглядом інструкції для працівників, а також надає методичну допомогу розробникам.

Типова інструкція та інструкція для працівників повинні містити наступні розділи:

- загальні вимоги безпеки;
- вимоги безпеки перед початком робіт;
- вимоги безпеки під час роботи;
- вимоги безпеки в аварійних ситуаціях;
- вимоги безпеки після закінчення робіт.

Перевірка інструкцій на відповідність вимогам діючих державних стандартів, санітарних норм і правил проводиться не рідше одного разу на 5 років.

Перевірка інструкцій для працівників за професіями або за видами робіт, пов'язаних з підвищеною небезпекою, проводиться не рідше одного разу на 3 роки.

Якщо протягом терміну дії інструкції, умови праці працівників на підприємстві не змінилися, то наказом роботодавця дію інструкції продовжується на наступний рік.

Видача інструкцій на підприємстві керівникам підрозділів організації проводиться службою охорони праці з реєстрацією в журналі обліку видачі інструкцій.

У керівника підрозділу організації постійно зберігається комплект діючих в підрозділі інструкцій для працівників усіх професій і за всіма видами робіт.

Інструкції працівникам видаються на руки під розписку, в особистій картці інструктажу для вивчення при первинному інструктажі, або зберігатися в іншому місці, доступному для працівників.

**Контроль організації охорони праці на підприємстві здійснюється:**

роботодавцем і керівниками підрозділів;

через спільний адміністративно-громадський контроль;

інспекторами державного спеціального нагляду;

інспекторами державної служби з охорони праці;

через огляди з охорони праці та техніки безпеки.

При чисельності працюючих більше 100 чоловік, створюється служба охорони праці або вводиться посада спеціаліста з охорони праці, а при чисельності менше 100 чоловік працюючих рішення про створення служби охорони праці приймає роботодавець з урахуванням специфіки діяльності даної організації. Якщо на підприємстві немає служби охорони праці, то

роботодавець укладає договір з фахівцем або організаціями, що надають послуги в галузі охорони праці.

Структура служби і її чисельність визначається роботодавцем, з урахуванням рекомендації федерального органу виконавчої влади, що відає питаннями охорони праці.

На даному підприємстві також є служба охорони праці, в яку входить гл. інженер і фахівець з охорони праці. Керує цією службою головний інженер.

## **6.2. Обов'язки служби охорони праці.**

Проводити аналіз стану і причин виробничого травматизму і професійних захворювань.

Розробляти заходи щодо попередження нещасних випадків і профзахворювань, а також організувати впровадження заходів.

Організувати роботу по проведенню перевірок технічного стану будівель, споруд, обладнання на відповідність їх вимогам техніки безпеки;

Організація роботи по атестації робочих місць на відповідність вимогам безпеки;

Участь в розслідуванні нещасних випадків та оформлення документації по розслідуванню;

Проведення вступного інструктажу.

### **Обов'язкові види інструктажів:**

- Вступний
- Первинний
- Повторний
- Поточний
- Позаплановий

Вступний інструктаж проводить головний інженер по 2-х годинною програмою.

знайомство з правилами внутрішнього трудового розпорядку з основною нормативною документацією;

з правилами поведінки на території;

з основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами;

із загальними засобами індивідуального та колективного засобів захисту;

з правилами протипожежної безпеки.

Результати оформляються в журналі, який зберігається у відділі праці, і підтверджуються підписами обох сторін.

Первинний інструктаж проводить майстер з знову які надходять на роботу, переведеними з іншого робочого місця або з іншої організації.

зміст:

знайомство з основним обладнанням шкідливими і небезпечними чинниками;

із загальними засобами індивідуального захисту.

Інструктаж супроводжується практичним показом прийомів і методів безпечної роботи.

Результати оформляються в журналі, який зберігається на ділянці і підтверджується підписами обох сторін.

Повторний інструктаж проводить спеціаліст з охорони праці через кожні три місяці за програмою первинного інструктажу з метою поновлення знань. Оформляється в тому ж журналі з підписами обох сторін.

Поточний інструктаж проводиться спеціалістом з охорони праці, безпосередньо перед початком робіт, на які оформляється наряд-допуск. Відмітка робиться в наряді, там же вказується термін, на який видається наряд.

Позаплановий інструктаж проводить головний інженер або інженер по техніці безпеки після грубих порушень вимог охорони праці, після нещасного випадку при впровадженні нової нормативної документації, при зміні ходу технологічного процесу при впровадженні нових засобів механізації. Позначку робить, інженер з охорони праці в своєму журналі підписи не ставляться. Позаплановий інструктаж проводять при перервах в роботі для робіт з підвищеною небезпекою понад 30 днів, для інших понад 60 днів

Основні види контролю:

- Оперативний керівник робіт та інших посадових осіб.
- Контроль вимоги безпеки праці при атестації робочих місць.
- Контроль, здійснюваний службою охорони праці.
- Відомчий контроль організацій.
- Державний контроль інспекціями Держнагляду.

Оперативний контроль здійснюється адміністрацією на всіх рівнях щодня в масштабах керованих нею підрозділів. Особлива роль при цьому належить майстрам і бригадирам, які здійснюють контроль перед початком роботи і на протязі робочого дня.

При атестації робочих місць поряд з оцінкою технічного оснащення робочих місць і їх організації проводиться аналіз їх відповідності вимогам охорони праці. До складу атестаційної комісії входять головні спеціалісти організації та фахівці служби охорони праці, а до складу атестаційної комісії ділянок обов'язково входять майстри і бригадири. За результатами атестації заповнюються карти атестації робочих місць. Офіційний висновок про оцінку умов праці дають органи експертизи умов праці, міністерства праці та соціального розвитку України. Атестація проводиться не рідше одного разу на

5 років з моменту проведення останніх вимірювань. На підприємстві при проведенні атестації видається наказ, в якому визначаються терміни і графік проведення робіт з атестації. Документи атестації робочих місць за умовами праці є матеріалами суворої звітності і підлягають зберіганню протягом 45 років.

Контроль, здійснюваний службою охорони праці, проводиться в декількох формах:

Цільові перевірки, які ставлять своїм завданням контроль виробничого обладнання за певною ознакою.

**Об'єктом контролю можуть бути:**

засоби колективного захисту в виробничих приміщеннях (система вентиляції, опалення, освітлення, кондиціонування). Контроль проводиться в масштабах всієї організації.

Комплексні перевірки проводяться на одній ділянці, в цеху. Об'єктом контролю є обладнання, яке перевіряється на відповідність комплексу техніки безпеки. Відомчий контроль проводиться у вигляді цільових і комплексних перевірок виробничого обладнання, які проводять комісії на чолі з головними комісіями міністерств і територіальних управлінь. Облік і розслідування нещасних випадків на виробництві ведеться відповідно до положення про розслідування нещасних випадків на виробництві. Умови поширюються на підприємства всіх видів власності.

**Відповідно до положення до обліку та розслідуванню підлягають:**

- нещасні випадки, які призвели до необхідності переведення працівника на іншу роботу
- тимчасову або стійку втрату ним працездатності
- або його смерть.

**Які відбулися:**

- на робочому місці
- на території підприємства
- за територією підприємства, але роботи виконувалися за письмовим наказом адміністрації; при проходженні до місця роботи або з роботи на транспорті, наданому організацією.

**При нещасному випадку роботодавець зобов'язаний:**

- організувати надання першої медичної допомоги;
- при необхідності доставити потерпілого до лікувального закладу;
- організувати формування комісії з розслідування;
- забезпечити збереження робочого місця або всього місця події до початку розслідування, якщо це не загрожує життю і в подальшому не призведе до аварії.

Положення про порядок розслідування нещасних випадків на виробництві, а також порядок обліку результатів виробничого контролю при вирішенні питань матеріального і морального стимулювання.

План заходів щодо забезпечення промислової безпеки на поточний рік;

Організація системи управління промисловою безпекою;

Прізвище працівника, відповідального за здійснення виробничого контролю, його посаду, освіту, стаж роботи за фахом, дата останньої атестації з промислової безпеки;

Кількість небезпечних виробничих об'єктів з описом потенційних джерел небезпек і можливих наслідків аварій;

Виконання плану заходів щодо забезпечення промислової безпеки, результати перевірок, усунення порушень;

План заходів щодо локалізації аварій і ліквідації їх наслідків;

Копії договорів страхування ризику відповідальності за заподіяння шкоди при експлуатації небезпечного виробничого об'єкта;

Стан устаткування, яке застосовується на небезпечному виробничому об'єкті і підлягає обов'язковій сертифікації;

Огляд і контрольні випробування небезпечних виробничих об'єктів;

План проведення контрольно-профілактичних перевірок на наступний рік;

Оцінка готовності працівників експлуатуючої організації до дій під час аварії;

Опис аварій і нещасних випадків, що сталися на небезпечному виробничому об'єкті, аналіз причин їх виникнення та вжиті заходи;

Підготовка та атестація керівників, фахівців та інших працівників, зайнятих на небезпечних виробничих об'єктах, в області промислової безпеки.

### **6.3. Загальні гарантії прав працівників на охорону праці**

Встановлення гарантій у нормативному порядку є однією з умов ефективної реалізації прав громадянина і людини. Законодавство України про охорону праці передбачає комплекс гарантій, спрямованих на реалізацію конституційного права на безпечні і нешкідливі умови праці. Позитивною рисою Закону України «Про охорону праці» є те, що цьому питанню присвячено окремий розділ.

Законодавство України встановлює загальні гарантії права на безпечні та нешкідливі умови праці, що надаються всім працівникам, а також передбачає додаткові гарантії для певних категорій працівників, що зумовлено підвищеними вимогами охорони їх здоров'я. До таких категорій належать працівники, які працюють у шкідливих і небезпечних умовах праці, неповнолітні особи, жінки, особи з пониженою працездатністю тощо.



Згідно зі ст. 5 Закону України «Про охорону праці» умови трудового договору не можуть містити положень, що суперечать законам та іншим нормативно-правовим актам з охорони праці. Тому у разі включення до його змісту умов, які погіршують правове становище працівників порівняно із законодавством про охорону праці, вони визнаються недійсними.

Відповідність умов трудового договору чинному законодавству про охорону праці повинна забезпечуватися і під час його реалізації. Умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних правових актів з охорони праці.

Важливою гарантією охорони праці є надання працівнику інформації про умови праці на підприємстві і, зокрема, на робочому місці. Крім загальних питань з охорони праці роботодавець зобов'язаний проінформувати громадянина про наявні на майбутньому робочому місці шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які ще не усунено. Водночас роботодавець повинен повідомити майбутнього працівника про можливі шкідливі, негативні наслідки впливу виробничих факторів на його здоров'я та ознайомити його з правом на відповідні пільги і компенсацію за роботу в таких умовах. Причому законодавець визначає форму виконаного роботодавцем обов'язку. Особа має бути проінформована роботодавцем під розписку. Оскільки в законодавстві не встановлено виду документа, у якому майбутній працівник розписується про одержання такої інформації, то його форма визначається на конкретному підприємстві, в установі, організації. Цим документом може бути спеціальний журнал, окрема розписка. Пропонується такі записи робити в особовій картці, акті атестації робочого місця.

Обов'язкове інформування працівника про зміни законодавства щодо охорони праці та приведення умов праці у відповідність до нього покладається

на роботодавця. Таке інформування здійснюється шляхом проведення навчання з питань охорони праці, наприклад, позапланового інструктажу.

Надання інформації працівникові про стан охорони праці має системний характер. Роботодавець зобов'язаний інформувати працівників під час їх роботи на підприємстві не лише про стан охорони праці, а й про причини аварій, нещасних випадків і професійних захворювань та про заходи, яких вжито для їх усунення та для забезпечення на підприємстві умов і безпеки праці на рівні нормативних вимог.

Гарантією права на безпечні і нешкідливі умови праці є виконання працівниками лише тих робіт, які не протипоказані їм за станом здоров'я, що забезпечується встановленням законодавчих обмежень при укладенні трудових договорів і переведенні працівників на легшу роботу.

Забороняється укладати трудовий договір з особами, яким за медичними висновками протипоказана запропонована робота за станом здоров'я.

Переведення з метою захисту здоров'я і збереження працездатності людини встановлюються у тих випадках, коли працівники тимчасово або постійно не можуть здійснювати роботу, на яку приймалися, але можуть без шкоди своєму здоров'ю виконувати іншу, легшу роботу. Поняття легшої роботи визначається у кожному конкретному випадку, враховуючи фізіологічні та психологічні можливості працівника належним чином виконувати роботу.

#### **6.4. Організація охорони праці на підприємстві, в установі, організації.**

Важливість створення системи управління охороною праці встановлюється міжнародними актами і договорами. Вона розглядається як необхідна гарантія забезпечення трудових прав працівників у сфері охорони праці. «Конвенція № 155 МОП про безпеку та гігієну праці та виробниче середовище» (1981 р.) ви-значила систему організації охорони праці на національному та виробничому рівні. На роботодавців покладається обов'язок

надавати робочі місця, механізми та обладнання, організувати виробничі процеси, які відповідають встановленим нормативам і не загрожують здоров'ю працюючих, вживати заходів щодо створення відповідних служб, на які покладаються комплексні функції управління охороною праці; співпрацювати з представниками працівників шляхом надання необхідної інформації, проведення консультацій з охорони праці; попереджувати виникнення виробничого травматизму та проводити розслідування й облік нещасних випадків і професійних захворювань; проводити навчання працівників з питань охорони праці та ін.

Законодавство України відображає значну частину міжнародних стандартів з організації управління охороною праці на різних рівнях. Закон України «Про охорону праці» містить окремий розділ про організацію охорони праці, її управління на підприємствах, в установах, організаціях. Система управління охороною праці передбачає:

створення роботодавцем відповідних служб, які забезпечують вирішення конкретних питань охорони праці;

досягнення встановлених нормативів з охорони праці шляхом впровадження прогресивних технологій, додержання вимог при проектуванні, будівництві та реконструкції підприємств, об'єктів і засобів виробництва;

проведення лабораторних досліджень умов праці, атестації робочих місць на відповідність нормативним актам про охорону праці та надання пільг і компенсацій за результатами їх проведення;

проведення обов'язкових медичних оглядів певних категорій працівників, навчання з питань охорони праці з метою попередження виробничого травматизму;

усунення причин, що призводять до нещасних випадків, професійних захворювань, здійснення їх розслідування й обліку та ін.

На виробництві можуть впроваджуватися й інші заходи з організації охорони праці. Ці заходи на підприємстві, в установі та організації закріплені спеціальних нормах, закріплених в КЗпП, Законі України “Про охорону праці” та в інших нормативно правових актах держави. Ці норми, об’єднані терміном «охорона праці», включають в собі норми і правила з техніки безпеки і виробничої санітарії. Відмінність норм з техніки безпеки від норм з виробничої санітарії визначається предметом, на регулювання якого спрямовані ті чи інші норми.

Норми з техніки безпеки містять обов'язкові вимоги, яким повинно відповідати підприємство в цілому, виробничі приміщення, усі види обладнання і технологічні процеси з точки зору безпеки праці, попередження травматизму. Цими нормами передбачається встановлення різних огорожень, захисних пристроїв, проведення профілактичних випробувань, дистанційне управління, видача спеціальних індивідуальних засобів захисту, наприклад поясів, окулярів, екранів тощо. Норми з виробничої санітарії містять обов'язкові вимоги щодо території підприємства, виробничих і побутових приміщень, робочих місць і технологічних процесів з точки зору гігієни праці і здоров'я працівників з метою попередження професійних захворювань. Вимоги в галузі виробничої санітарії стосуються розмірів, планування і конструктивних елементів виробничих будівель, вентиляції, опалення, водопостачання, каналізації, освітлення побутових приміщень, пунктів харчування, охорони праці тощо. Норми з виробничої санітарії передбачають також професії з шкідливими умовами праці, які повинні забезпечуватись спецмолоком, спецхарчуванням, спецодягом, спецвзуттям та іншими індивідуальними захисними засобами.

Не слід думати, що норми з техніки безпеки і виробничої санітарії є окремими нормативними актами. В державних міжгалузевих і галузевих нормативних актах можуть одночасно міститися й положення з техніки безпеки і норми з виробничої санітарії.

## Висновок

В даній роботі була розкрита основна мета її написання: ознайомлення та аналіз поняття охорона праці, процесу закріплення охорони праці в Україні, затвердження охорони праці в необхідних нормативно правових актах держави, чільне місце серед яких посідає Закон України “Про охорону праці”; визначення стану захищеності жінок, неповнолітніх та осіб зі зниженою працездатністю в процесі їхньої трудової діяльності; детальне ознайомлення з гарантіями прав працівників на охорону праці, що гарантуються і забезпечуються державою. Все це прослідковується і визначається після детального, поглибленого наукового аналізу даної моєї праці та джерел.

Детально зупинився на понятті охорони праці, описуючи загальні засади такого явища як “охорона праці на підприємстві, в організації, установі”.

Нормативні документи, що складають нормативно-правову базу з охорони праці, це є:

1. Конституція України;
2. Закон України “Про охорону праці”;
3. Міжгалузеві і галузеві нормативні акти;
4. Міжнародні стандарти системи стандартів безпеки праці;
5. Державні стандарти України;
6. Правила, норми, положення, інструкції керівництва або вказівки, вимоги, рекомендації, технічні умови безпеки.

### Список використаної літератури:

1. Конституція України: Прийнята на п'ятій сесії Верховною Радою України 28 .06.96р.-К.:Преса України, 1997.-80с.
2. Кодекс законів про працю України: Чинне законодавство зі змінами та доповненням на 01.08. 2004р.:К.:Вид. Паливода А.В., 2004.-112с.
3. Про охорону праці: Закони України: Затв. Верховною Радою України від 14.10.1992р.№2695-ХІІ// Законодавча база "LIGA Закон".
4. Про страхові тарифи та загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності: Закон України від 22.02.01р.№2277-ІІІ// Законодавча база "LIGA Закон".
5. Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення: Закон України від 24 02.94 р.//Законодавча база "LIGA Закон"
6. Про основні напрями розвитку трудового потенціалу в Україні на період до 2010 року: Указ Президента України від 03.08.99р. №958/99// Законодавча база "LIGA Закон".
7. Положення про порядок накладання штрафів на підприємства, установи, організації за порушення нормативних актів про охорону праці: Затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 17.09.93р.№754// Законодавча база "LIGA Закон".
8. Положення про розслідування і облік нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на підприємстві, в установі і організації: Затв. Постановою Кабінету Міністрів України від10.08.93з.№623// Законодавча база "LIGA Закон".

9. Перелік важких робіт і робіт зі шкідливими та небезпечними умовами праці, на яких забороняється використання праці неповнолітніх: Затв. Наказом Міністерства охорони здоров'я України від 31.03.94р.№46// Законодавча база "LIGA Закон".

10. Перелік важких робіт і робіт зі шкідливими та небезпечними умовами праці, на яких забороняється використання праці жінок: Затв. наказом Міністерства охорони здоров'я України від 29.12.93р.№256// Законодавча база "LIGA Закон".

11. Граничні норми підйому і переміщення тяжких предметів жінками: Затв. наказом Міністерства охорони здоров'я від 10.12.93р.№241// Законодавча база "LIGA Закон".

12. Трудове право України :навч. Посібник для студ. Юрид. Спеціальностей Вищих навч. Закладів/ Пилипенко П.Д., Бурак В.Я., Козак З.Я. та ін.;За ред. П.Д. Пилипенка.-К.:Видавничий дім "ін Юре", 2003.-535с.

13. Трудове право: Прокопенко В.І.-К.: Вен Турі,96р.,223с.

14. Трудове право: Болотіна Н.Б.,Чанишева.-К.,01р.-563с.

15. Практикум: Болотіна Н.Б.,02р.-287с.