

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

**Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та
навігаційних систем**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
технології та системи навігації і керування»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Компенсаційний датчик кутової швидкості»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПГ-91
Литвинова Єлизавета Володимирівна

Керівник:

Ст. викладач, к.т.н.
Сапегін Олександр Миколайович

Рецензент:

Доцент, к.т.н, доц.
Шевченко Вадим Володимирович

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

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

Інститут (факультет) _____ Приладобудівний _____
(повна назва)

Кафедра _____ Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність _____ 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Н.І.

Бурау

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2023

р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

_____ Литвиновій Єлизаветі Володимирівні _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи _____ Компенсацийний датчик кутової швидкості

Науковий керівник роботи _____ Сапегін Олександр Миколайович, ст.
викладач

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « _____ » _____ 2023 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту « _____ » _____ 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

діапазон вимірювання +/- 30 °/с; поріг чутливості 0,1 °/с; перехресне прискорення 3g; похибка вимірювання – 0,05%; похибка від перехресного прискорення - 0,2%; динамічна похибка приладу 0,3%; вага 4Н; кінетичний момент до 2,5 н·м температурний діапазон експлуатації +60° – 60° С; час готовності -3 хв., прискорення по осі вимірювання 4g.

4. Зміст роботи Вступ. 1. Обґрунтування вибору конструктивної схеми. 2. Визначення габаритів і типу підвісу. 3. Вибір датчика кута та датчика моменту 4. Розрахунок основної методичної похибки приладу та елементів підвісу ЧЕ. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Кінематична схема приладу 1 А1, складальний кресленик А1, деталювання 2 А1, презентація.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04.2023

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
.	Огляд літературних джерел за темою ДП	05.05.2023	
.	Огляд та класифікація ДКШ	15.05.2023	
.	Розрахунок параметрів КДКШ	25.05.2023	
.	Створення креслень	10.06.2023	
.	Оформлення рукопису ДП, підготовка до захисту	12.06.2023	

Студент

_____ (підпис)

Єлизавета ЛИТВИНОВА
(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проекту

_____ (підпис)

Олександр САПЕГІН
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект на тему «Компенсаційний датчик кутової швидкості» містить сторінку, 2 додатки, 2 таблиці та складається з трьох розділів.

У першому розділі був проведений огляд сучасних датчиків кутової швидкості, описані основні принципи робіт, деякі особливості, наведені деякі недоліки та переваги цих систем. Особливу увагу приділено поплавковому гіроскопу, який використовується як компенсаційний гіротахометр, його математичній моделі, принципу роботи, основним принципам конструкції.

Другий розділ присвячений вибору характеристик та конструкції приладу, що найкраще відповідають вимогам представленим у завданні. Була вибрана конструкційна схема, визначені габарити гіротахометра, був обраний гіродвигун та опори, розраховані основні похибки.

Ключові слова: датчик кутової швидкості, гіротахометр, поплавковий гіроскоп, похибка.

ABSTRACT

The diploma project on "Compensatory angular velocity sensor" contains a page, 2 appendices, 2 tables and consists of three chapters.

In the first chapter, an overview of modern angular velocity sensors was made, the basic principles of operation, some features, and some disadvantages and advantages of these systems were described. Particular attention is paid to the float gyroscope used as a compensating gyrotachometer, its mathematical model, operating principle, and basic design principles.

The second section is devoted to the selection of characteristics and design of the device that best meet the requirements presented in the task. The design scheme was chosen, the gyrotachometer dimensions were determined, the gyro motor and supports were selected, and the main errors were calculated.

Keywords: angular velocity sensor, gyrotachometer, float gyroscope, error.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ	9
1.1. Кільцевий лазерний гіроскоп	9
1.2 Волоконно-оптичний гіроскоп	10
1.3 Гіроскопи з вібраційною структурою	12
1.3.1 Хвильові твердотільні гіроскопи	12
1.3.2 Мікромеханічні гіроскопи	13
1.3.3 П'єзоелектричні гіроскопи	15
1.3.4 Вібраційні кільцеві гіроскопи	16
1.3.5 Камертоні гіроскопи	17
1.4 Опис компенсаційного датчика кутової швидкості та принцип його роботи	19
1.4.1 Конструкція поплавкового гіроскопу	26
1.4.2 Математична модель	28
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	32
2.1. Вибір конструктивної схеми	32
2.2. Визначення габаритів ГТ	32
2.2.1. Розрахунок основних параметрів ГТ	32
2.2.2 Вибір гіродвигуна	33
2.2.3 Розрахунок поплавка рухомого вузла	38
2.2.4 Розрахунок основних параметрів датчика моменту	38
2.2.5 Опис розробленої конструкції	39

2.2.6 Вибір опор	40
2.2.7 Визначення температури перегріву	41
2.2.8 Визначення максимального кута	44
2.2.9 Визначення коефіцієнта демпфірування	45
2.3 Аналіз похибок приладу	45
ВИСНОВОК.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
ДОДАТОК А.....	57

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій у різних сферах вимагає високої точності та стабільності вимірювань. Особливо важливими є вимірювання обертових рухів об'єктів, що відбуваються зі зміною кутової швидкості. Для досягнення найвищої точності вимірювань використовуються компенсаційні датчики кутової швидкості. Загалом сфера застосувань включає авіаційну, космічну, автомобільну, промислову та інші галузі. Наразі існує багато різноманітних датчиків кутової швидкості, що можуть відповідати певним потребам від мікроелектромеханічних систем, які не є найточнішими, але за рахунок розмірів і відносної простоти виробництва дуже часто знаходять своє застосування в портативних приладах, до високоточних лазерних і твердотільних гіроскопів, що використовуються в аеро-космічних галузях.

Ця робота присвячена розробці компенсаційного датчика кутової швидкості, зокрема компенсаційного гіротахометра. Хоча прилади с такою конструкцією існують давно, вони все ще не втратили своє актуальності та займають свою почесну нішу, в той же час з появою нові технологій, данні системи можуть бути покращенні.

Для виконання креслень використовувалось програмне середовище AutoCAD.

Дипломна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

1.1. Кільцевий лазерний гіроскоп

Кільцевий лазерний гіроскоп (рис. 1.1.) містить замкнутий резонатор у формі кільця, що використовує вимушене випромінювання (лазер) для посилення випромінювання. Завдяки суперпозиції інших променів, всі хвилі, окрім стоячої, гасяться. Це призводить до циркуляції двох когерентних променів однакової довжини хвилі у протилежних напрямках. У кільцевому лазері фаза стоячої хвилі є випадковою через випадкове положення максимумів і мінімумів. Обертання змінює довжину шляхів променів, що призводить до компенсації шляхів протилежно циркулюючих променів. Щоб спостерігати стоячу хвилю, частину променів роз'єднують, аби підсилювальний тракт міг компенсувати втрати, і ці часткові промені інтерферують на детекторі [2].



Рис. 1.1 Кільцевий лазерний гіроскоп [1]

За рахунок цифрового виходу для кутового приросту, високої чутливості, стабільної вхідної осі, простоту вимірювання в широкому діапазоні імовірних значень та нечутливості до прискорень завдяки відсутності рухомих частин кільцевий лазерний гіроскоп відповідає критеріям ідеального датчика кутової швидкості [2].

При низьких швидкостях обертання виникає фундаментальна проблема - ефект замикання, який полягає у тому, що розсіяне світло викликає паралельні колювання у протилежному напрямку обертання. Це призводить до однакової частоти лазерних колювань при швидкостях обертання нижче порогу блокування, але різниця частот збільшується при вищих швидкостях обертання, хоча менше, ніж передбачає теорія [2].

Нелінійність не становила би проблеми, якщо вимірювались би тільки швидкості обертання вище порогу блокування, але цей поріг не є постійним та змінюється в залежності від розсіювання, яке в свою чергу залежить в тому числі від кількості частинок пилу на дзеркалах. Більше того, розсіяні хвилі на дзеркалах взаємодіють між собою, що призводить до посилення або ослаблення залежно від фазового положення. На ефект блокування сильно впливає відстань між дзеркалами, яка має бути стабільною з мінімальним тепловим розширенням. Крім того, необхідною умовою є дотримання постійної температури [2].

Для уникнення ефекту блокування в авіаційній техніці лазерний гіроскоп або обертається з постійною кутовою швидкістю (зміщення швидкості), або колюється з певною періодичністю. Це дозволяє вимірювати обертання, навіть коли система не рухається і перевищує поріг блокування [2].

1.2 Волоконно-оптичний гіроскоп

Волоконно-оптичний гіроскоп (рис. 1.2) складається з котушки оптичного волокна і використовує інтерференцію світла для виявлення

обертання. Два промені вводяться в волокно в протилежних напрямках. Промінь, що рухається проти обертання, зазнає меншої затримки через ефект Саньяка. Результативний зсув фази вимірюється за допомогою інтерферометрії, перетворюючи кутову швидкість в зсув інтерференційної картини, який фотометрично вимірюється [4].

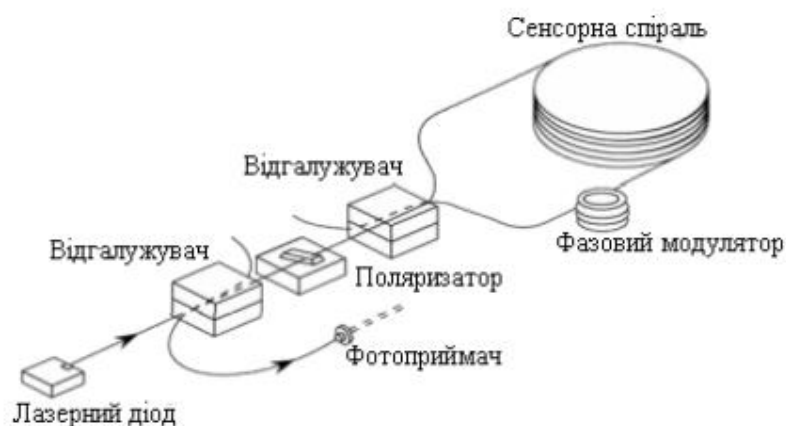


Рис. 1.2 Принципова схема волоконно-оптичного гіроскопа [3]

Значною перевагою ВОГ є компактність, оскільки волокно може бути укладене навколо котушки діаметром 10 см. Це дозволяє окрім іншого збільшити чутливість гіроскопа. Також для підвищення точності у волоконно-оптичних гіроскопах використовується світло з малою довжиною когерентності. Іншою відмінністю ВОГ є те, що джерелом світла може бути як лазерний прилад так і світлодіод [4].

Серед недоліків є чутливість до вібрацій, дію якої можна зменшити, поєднуючи гіроскоп з акселерометрами. Калібрування ВОГ, так само як і як інших гіроскопічних систем, потрібне регулярно. Є обмеження вимірювання кутової швидкості через ефект Саньяка. Коливання інтенсивності світла, яке падає на фотоприймач, може погіршити лінійність і стабільність масштабного коефіцієнта гіроскопа [4].

1.3 Гіроскопи з вібраційною структурою

Фізичний принцип гіроскопів з вібраційною структурою полягає в тому, що об'єкт, що вібрує, має тенденцію продовжувати свої коливання в тій самій площині, навіть якщо його опорна платформа обертається. Ефект Коріоліса змушує об'єкт зазнавати силу через його рух по відношенню до опори, що обертається, і шляхом вимірювання цієї сили можна визначити швидкість обертання [5].

Головна перевага гіроскопів з вібраційною структурою полягає в їх простоті та низькій вартості порівняно з традиційними гіроскопами, при цьому забезпечуючи подібну точність вимірювань. Вони можуть бути виготовлені з використанням доступних матеріалів і технологій, що робить їх більш апмвабливими для широкого кола застосувань [5].

1.3.1 Хвильові твердотільні гіроскопи

Хвильовий твердотільний гіроскоп, зображений на рисунку 1.3, працює на основі принципів маятника і резонансу Фуко. За допомогою невеликої деформації скла генерується хвиля, вимірювання положення якої дозволяє визначити обертання гіроскопа [6].

Зазвичай конструкція твердотільного гіроскопа включає в себе тонку напівпровідникову напівсферичну оболонку резонатора, яка закріплена на циліндричному стрижні. Кільцевий електрод розташований по внутрішній поверхні обкладки збудження, що оточує край резонатора. Електрична сила, що виникає, зворотно пропорційна квадрату відстані між кільцевим електродом і резонатором. Коли резонатор не деформований, електрична сила урівноважується внутрішнім напруженням резонатора. Проте, при деформації резонатора сила розтягування збільшується зі зменшення відстані, і це призводить до більшої деформації резонатора. Коли резонатор рухається в напрямку максимальної деформації, напруга живлення завжди

увімкнена. А коли резонатор повертається до положення рівноваги внаслідок інерції, напруга живлення вимикається [6].



Рис. 1.3 Хвильовий твердотільний гіроскоп [7]

Твердотільний хвильовий гіроскоп відрізняється компактним розміром, низьким рівнем шуму, високою продуктивністю та відсутністю зносу, що є основними причинами його використання в космічних місіях [6].

Основними недоліками цього типу датчиків кутової швидкості є висока технологічність та вартість виробництва [8].

1.3.2 Мікромеханічні гіроскопи

Основним принципом вібраційних гіроскопів MEMS є два режими роботи: режим руху, який забезпечує постійну вібрацію вздовж осі руху, та режим чутливості, який виявляє рух вібрації вздовж чутливої частини осі при зовнішньому обертанні [10].

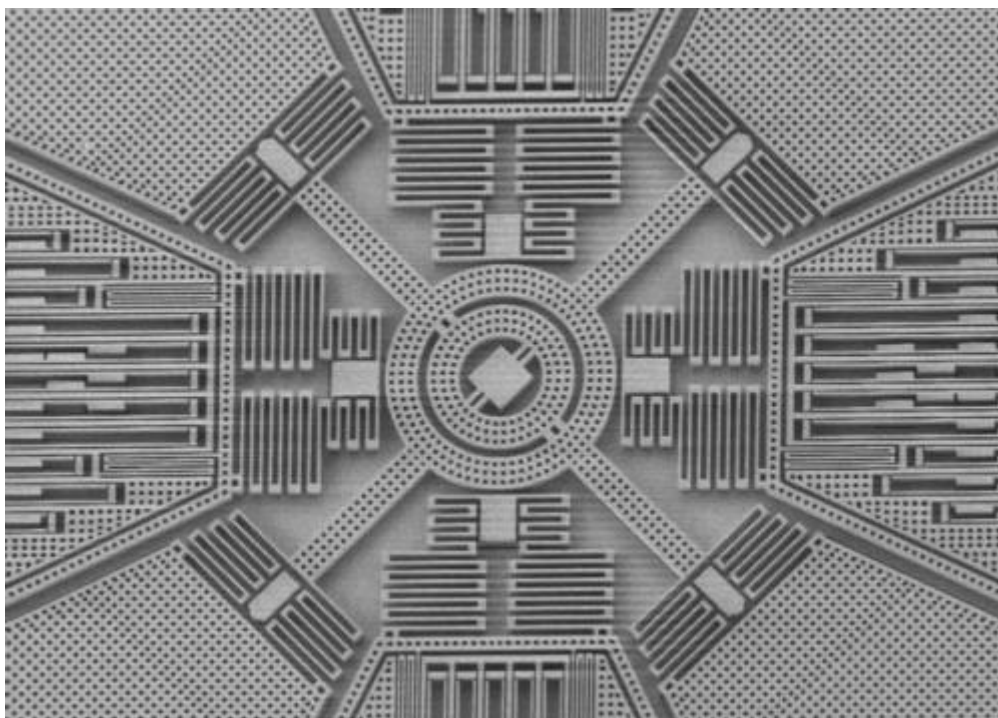


Рис. 1.4 Мікромеханічний гіроскоп [9]

Більшість вібраційних гіроскопів MEMS мають масу з двома ортогональними ступенями свободи: вертикальним та горизонтальним. Коли гіроскоп постійно вібрує у напрямку резонансної частоти в одному напрямку, коливання в ортогональному напрямку відсутні, поки гіроскоп не піддається зовнішньому обертанню. Зовнішнє обертання спричиняє зсув енергії першої вібрації в ортогональному напрямку через ефект Каріоліса [10].

Мікромеханічні гіроскопи зазвичай мають 3 ортогональні виміри, але також можуть бути одноосьовими або двоосьовими. Існує різний рівень якості гіроскопів, залежно від вимог конкретного застосування. Наприклад, гіроскопи для споживчого сегменту зазвичай є дешевшими, ніж ті, що використовуються у промисловості або автомобільній сфері, оскільки останні працюють у більш широкому діапазоні температур і мають більш стабільну роботу для відповідності вимогам безпеки [10].

Існує кілька поширених механізмів, на основі яких реалізуються вібраційні мікромеханічні гіроскопи, а саме:

- електростатичний
- п'єзоелектричний
- електромагнітним
- електротермічним

Недавні розробки в гіроскопах привели до популярності наступних ключових конструкцій:

- вібраційне кільце
- камертон
- роз'єднані та подвійні маси

Гіроскопи MEMS (мікроелектромеханічні системи) стали популярними завдяки своєму компактному розміру, енергоефективності, низькій вартості виробництва, високій продуктивності і чутливості, а також можливості масового виробництва [10].

Однак, у гіроскопів MEMS є деякі недоліки. Вони менш стійкі до змін температури, вологості та механічних навантажень, хоча деякі з цих проблем можна компенсувати за допомогою програмного забезпечення. Вимірювання в гіроскопах MEMS може бути менш точним порівняно з іншими типами гіроскопів. Часто спостерігається варіація продуктивності між різними пристроями та партіями. Для досягнення найкращих результатів часто потрібна калібрування пристрою перед кожним новим використанням [10].

1.3.3 П'єзоелектричні гіроскопи

П'єзоелектричні гіроскопи (рис. 1.5) використовують п'єзоелектричні генератори для вимірювання кутової швидкості і можуть використовуватися для компенсації тремтіння рук у відео- та цифрових фотокамерах. Робочий принцип п'єзоелектричних гіроскопів схожий на принцип маятника Фуко. П'єзoeлемент збуджує коливання стрижня, який функціонує як маятник. Сила Коріоліса, що виникає при русі, потім вимірюється після перетворення її п'єзoeлементом на напругу [11].

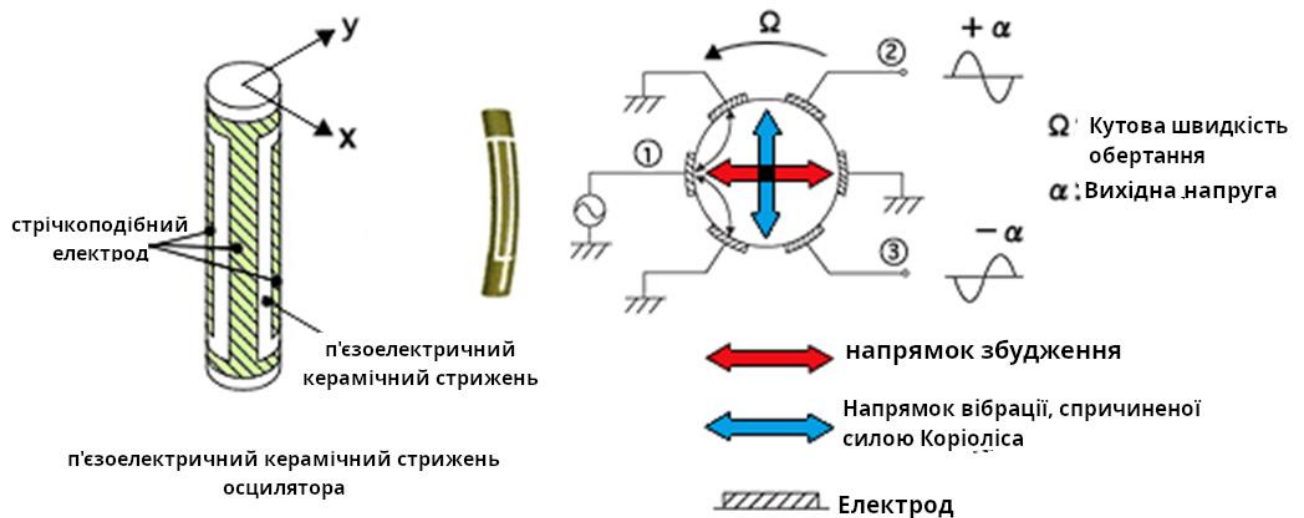


Рис. 1.5. П'єзoeлектричний гіроскоп [12]

П'єзoeлектричні вібраційні гіроскопи мають кілька переваг перед іншими типами гіроскопів. Вони компактні та легкі, що робить їх ідеальними для використання в портативних пристроях, наприклад, смартфонах та дронах. Вони також характеризуються низьким споживанням енергії та високою чутливістю, що означає, що вони можуть виявляти навіть незначні зміни швидкості обертання. Крім того, вони стійкі до зовнішніх магнітних полів, які можуть впливати на інші типи гіроскопів [13].

1.3.4 Вібраційні кільцеві гіроскопи

Вібраційні кільцеві гіроскопи мають симетричну структуру і мають кращі певні характеристики аніж інші конструкції гіроскопів. Вони забезпечують високу точність, високу роздільну здатність, кращу стійкість до температурних змін, краще узгодження робочих частот, низький рівень нульового виходу та підвищену чутливість. Структура включає зовнішнє кільце з вісьмох пружин, які підтримуються круглим анкером, розташованим у центрі. Схематичне зображення основної конструкції вібраційного кільцевого гіроскопа показано на Рис. 1.6 [15].

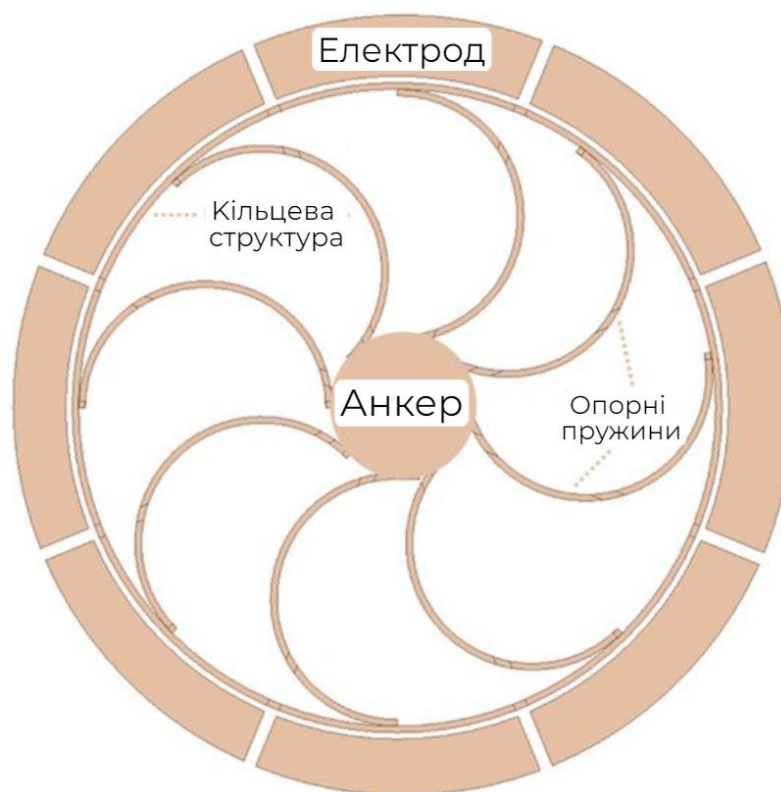


Рис. 1.6. Вібраційний кільцевий гіроскоп [14]

Вібраційна структура гіроскопа оточена вісьмома рухомими і чутливими електродами. Рухомі електроди забезпечують неперервні коливання вздовж осі руху. Рух кільця відбувається чітко у напрямку руху, однак у напрямку чутливих електродів руху немає. Коли гіроскоп піддається зовнішньому обертанню, еліптична форма коливань переміщується до чутливих електродів. При обертанні пристрою первинне коливання спричиняє вторинне коливання у напрямку зчитування через ефект Коріоліса. Чутливі електроди реєструють зміну переміщення [15].

1.3.5 Камертоні гіроскопи

Камертоні гіроскопи є однією з найпопулярніших конструкцій гіроскопів на основі MEMS. У цих конструкціях присутні дві однакові маси, які рухаються з однаковою амплітудою, але в протилежних напрямках. Коли гіроскоп починає обертатися навколо рушійної осі, що перпендикулярна до рухомих мас, сила Коріоліса виникає і спонукає маси рухатися в напрямку

осі чутливості. Механізм приведення в рух та чутливий механізм використовують електростатичні впливи і ємнісне зондування відповідно, що забезпечує підвищений рівень чутливості порівняно з іншими конструкціями. Схематичне зображення роботи гіроскопа з камертоном на основі MEMS показано на Рис. 1.7 [15].

У цій системі частота коливань чутливого камертона відповідає частоті коливань ведучого камертона, а амплітуда коливань чутливого камертона прямо пропорційна сумі амплітуди коливань і кутової швидкості ведучого камертона. Вихідні сигнали, що генеруються чутливим камертоном за допомогою п'єзоелектричного ефекту, виявляються зовнішньою схемою, підсилюються і демодулюються для отримання сигналу постійної напруги, який пропорційний вхідній кутовій швидкості. Крім того, протилежні фази коливань двох зубців камертона протидіють ефекту прискорення. Важливо зазначити, що гіроскоп з камертоном чутливий до кутової швидкості лише в напрямку однієї осі [16].

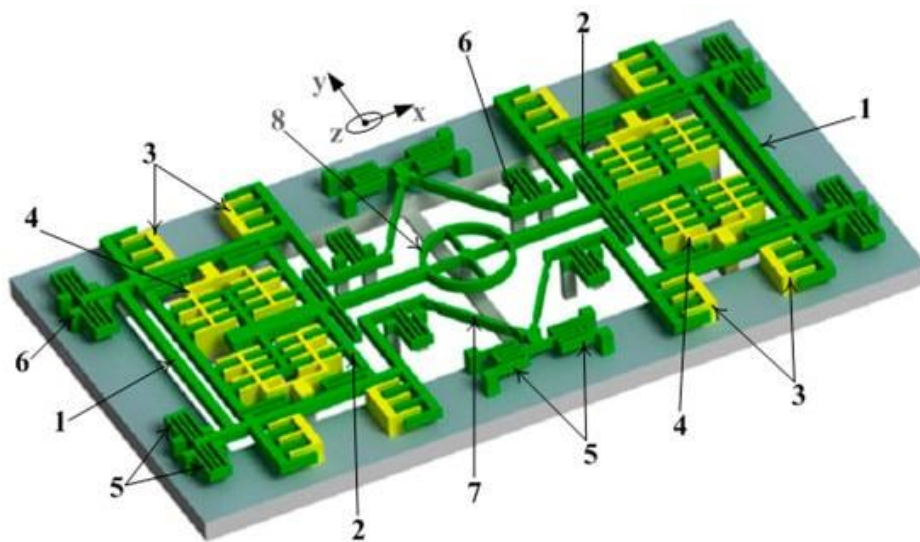


Рис. 1.7 Камертонний гіроскоп складається з (1) зовнішньої рамки, (2) внутрішньої рамки, (3) рушійних гребінчастих електродів, (4) паралельного пластинчастого чутливого електроду, (5) подвійно складених балок, (6) анкерів, (7) лінійних балок і (8) кільця, що самообертається [16].

Існує значна кількість технологій на основі яких створюються гіроскопи такого типу, наприклад технології нікелевого електроформування, реактивного іонного травлення полікремнію та технології монокристалічного кремнію на склі, кремнієве з'єднання та глибоке реактивне іонне травлення [15].

1.4 Опис компенсаційного датчика кутової швидкості та принцип його роботи

Датчик кутової швидкості складається з гіроскопу з двома ступенями вільності, обертання якого навколо осі рамки (кожуха) обмежено пружним зв'язком з корпусом приладу [17].

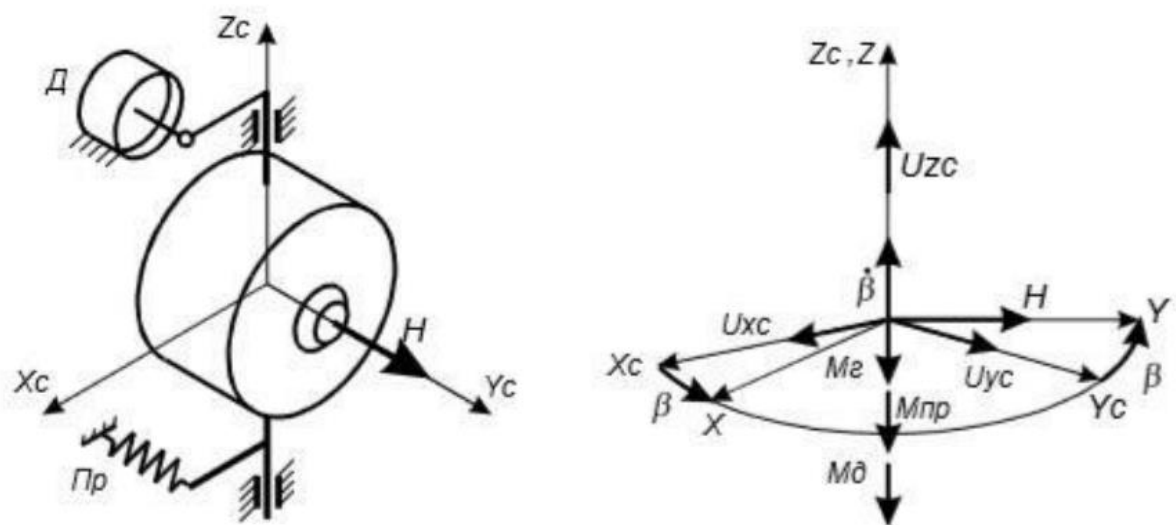


Рис. 1.8 Кінематична схема

Для того, щоб перетворити двоступеневий гіроскоп на вимірювач кутової швидкості його потрібно спорядити пружним зв'язком, що створюватиме момент сил пружності $M_{np} = -c\beta$ відносно вимірювальної осі [17].

При обертанні основи в екваторній площині з кутовою швидкістю U_{xc} , спрямованого по осі x_c (осі чутливості) та кутовою швидкістю U_{yc} ,

спрямованого по осі y_c (так званої перехресної осі чутливості), виникає гіроскопічний момент $M_\Gamma = -(HU_{xc} \cos \beta + HU_{yc} \sin \beta)$, спрямований вздовж вимірювальної осі z_c . Він викличе поворот осі на кут β та деформацію пружини. У положенні рівноваги гіроскопічний момент урівноважується моментом $c\beta$ пружного зв'язку. З рівності двох моментів випливає:

$$\beta = \frac{H}{C} \cdot (U_{xc} \cos \beta + U_{yc} \sin \beta) \quad (1.1)$$

Таким чином, кут β повороту головної осі двоступеневого гіроскопа містить інформацію про величину кутової швидкості обертання основи як навкруги осі чутливості x_c , так і осі y_c , тобто екваторіальної складової кутової швидкості обертання основи [17].

Кутова швидкість обертання основи U_{zc} викликає появу гіроскопічного моменту $M_{\Gamma 2} = HU_{zc}$, спрямований вздовж осі x . Цей момент урівноважується реакціями опор, не викликаючи рухів головної осі [17].

У вірно спроектованих приладах кут повороту β не перевищує одиниць градусів, тому можна вважати, що $\cos \beta \approx 1$. Тоді можна знехтувати другою складовою в виразі [17].

$$\beta \approx \frac{H}{C} \cdot U_{xc} \quad (1.2)$$

Коефіцієнт пропорційності $k = \frac{H}{C}$ між вимірювальною кутовою швидкістю та кутом повороту β називають статичним коефіцієнтом передачі датчика кутової швидкості [17].

У ДКШ з механічним пружним зв'язком вхідна величина U перетворюється в вихідну β за схемою:

$$U \rightarrow M_\Gamma = H \cdot U \rightarrow \beta = \frac{H}{C} \cdot U \quad (1.3)$$

Рівність має силу за умов обертання основи із сталою кутовою швидкістю та відсутності збурюючих моментів після закінчення перехідного процесу встановлення положення рівноваги [17].

Для забезпечення згасання вільних коливань гіроскопу використовують також демпфер (заспокоювач коливань), який створює протидіючий момент, пропорційний швидкості повороту гіроскопу навкруг вимірювальної осі [18].

Розглянемо поведінку двостепеневого ДКШ при умові довільного обертання основи. Зв'яжемо з основою систему координат $X_c Y_c Z_c$, з рамкою гіроскопу систему координат XYZ (Рис. 1.8). Взаємне розташування цих систем координат визначається кутом β . Основа обертається з довільною кутовою швидкістю U , що визначається проекціями U_{x_c} , та U_{z_c} на відповідні осі. Для складання рівнянь руху використаємо метод кінетостатики, утримуючи в рівняннях тільки моменти сил інерції обертального прискорення, гіроскопічні моменти та зовнішні моменти – збурюючі та ті, що створюються пружним зв'язком та демпфером [17].

Згідно з Рис. 1.8, гіроскопічний момент має дві складові, обумовлені обертанням основи з кутовими швидкостями U_{x_c} та U_{y_c} спрямовані вздовж від'ємного напрямку вимірювальної осі:

$$M_{\Gamma 1} = -H \cdot U_{x_c} \cos \beta \text{ та } M_{\Gamma 2} = -H \cdot U_{y_c} \cos \beta \quad (1.4)$$

Поява моменту сил інерції обертального прискорення обумовлена рухом гіроскопу з прискоренням $\varepsilon = \ddot{\beta} + \dot{U}_{z_c}$ в інерціальному просторі відносно вимірювальної осі Z_c . Величина цього моменту дорівнює $M_0 = -I_1(\ddot{\beta} + \dot{U}_{z_c})$, де I_1 – момент інерції гіроскопу спільно з рамкою підвісу відносно осі Z_c . Зовнішній момент сил пружності пружин дорівнює $M_{\text{пр}} = -C\beta$ момент сил демпфірування. Головним збурюючим моментом відносно вимірювальної осі є момент сил сухого тертя $M_T = M_{T0} \sin \dot{\beta}$ [17].

Згідно з методом кінетостатики проекція всіх моментів на вимірювальну вісь повинна дорівнювати нулю, тому одержимо:

$$I_1(\ddot{\beta} + U_{Z_c}) + f\dot{\beta} + C\beta = -H \cdot U_{X_c} \cos \beta - H \cdot U_{Y_c} \sin \beta - M_{T0} \sin \beta \quad (1.5)$$

або

$$I_1\ddot{\beta} + f\dot{\beta} + C\beta = -H \cdot U_{X_c} \cos \beta + M_{\Pi}, \quad (1.6)$$

де $M_{\Pi} = -H_{Z_c} \sin \beta - I_1\dot{U}_{Z_c} - M_{T0} \sin \beta$ – сума моментів-перешкоджань, діючих вздовж вимірювальної осі.

Так як ми вважаємо, що $\cos \beta \approx 1$, а момент перешкод значно менший вимірюваного моменту $H \cdot U_{X_c}$. Тому при дослідженні динаміки руху датчика кутової швидкості можна використовувати рівняння руху у вигляді:

$$I_1\ddot{\beta} + f\dot{\beta} + C\beta = -H \cdot U_{X_c} \quad (1.7)$$

Лінеаризоване рівняння часто записують також у вигляді:

$$\ddot{\beta} + 2h\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \frac{H}{I_1} \cdot U_{X_c}, \quad (1.8)$$

де $h = \frac{f}{2I_1}$ – коефіцієнт згасання власних коливань; $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{I_1}}$ – частота

власних незгасаючих коливань ДКШ.

U_{Y_c} Розв'язок рівняння за умов $U_{X_c} = \text{const}$, $\beta(0) = \dot{\beta}(0) = 0$ має вигляд:

$$\beta = \frac{H \cdot U_{X_c}}{C} \left(1 - e^{-ht} \left(\frac{h}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \cos \omega_1 t \right) \right), \quad (1.9)$$

де $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ – частота власних згасаючих коливань рухомої частини.

В одержаному розв'язку складова $\frac{H \cdot U_{X_c}}{C}$ визначає усталене відхилення головної осі від положення рівноваги, що відповідає вимірюваній кутовій швидкості U_{X_c} . Складова $-\frac{H \cdot U_{X_c}}{C} \cdot e^{-ht} \left(\frac{h}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \cos \omega_1 t \right)$ визначає власні коливання, що супроводжують процес переходу рухомої частини в

положення рівноваги. За умов оптимального вибору коефіцієнта згасання h , ця складова згасає за досить короткий проміжок часу. В такому випадку розв'язок рівняння співпадає з формулою [17].

Розглянемо вимушений рух датчика кутової швидкості, якщо вимірювана кутова швидкість змінюється за гармонійним законом $U = U_0 \sin \omega_u t$. Частковий розв'язок рівняння, який визначає вимушений рух, має вигляд:

$$\beta = \frac{H}{I_1} \cdot \frac{U_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_u^2)^2 + 4h^2 \omega_u^2}} \cdot \sin(\omega_u t - \phi(\omega_u)), \quad (1.10)$$

де $\phi(\omega_u) = \arctg \frac{2h\omega_u}{\omega_0^2 - \omega_u^2}$ – відставання за фазою коливань головної осі від частоти кутової швидкості U . [17]

Розв'язок можна записати також у вигляді:

$$\beta = \frac{H}{C} \cdot U_0 \cdot K^* \cdot \sin(\omega_u t - \phi(\omega_u)) = k \cdot K^* \cdot U_0 \sin(\omega_u t - \phi(\omega_u)), \quad (1.11)$$

де $K^* = \frac{1}{\sqrt{(1 - \nu^2)^2 + \frac{4h^2 \nu^2}{\omega_0^2}}}$ – коефіцієнт динамічності, який показує, у скільки

разів амплітуда коливань рухомої частини приладу перевищує її відхилення при сталому значенні $\omega_u = 0$ вимірюваної швидкості U_0 ; $\nu = \frac{\omega_u}{\omega_0}$ – відносна частота вимірюваної швидкості [17].

Гіротахометри - це гіроскопічні пристрої, які використовуються для вимірювання абсолютної кутової швидкості об'єкта і базуються на поплавковому двоступеневому гіроскопі. Коли об'єкт обертається і виникає кутова швидкість, яка проєкціюється на ось чутливості гіротахометра, гіроскопічний момент виникає і призводить до обертання гіромотора навколо вимірювальної осі. Кут повороту гіромотора пропорційний величині кутової швидкості об'єкта. Щоб знизити поріг чутливості, гіродвигун двоступеневого датчика розташовують у герметичній камері, яка занурена у спеціальну

рідину. Це дозволяє зменшити навантаження на підшипники гірокамери і знизити момент сил сухого тертя. Крім того, часто використовують компенсаційні датчики, які використовують принцип "електричної пружини" - оберненого зв'язку, що виникає за рахунок моменту, що компенсує гіроскопічний момент. Напруга, необхідна для створення моменту компенсації, пропорційна проекції абсолютної кутової швидкості на ось чутливості датчика кутової швидкості. Схема поплавкового датчика кутової швидкості показана на Рис. 1.9.[17].

Компенсаційні тахометри використовуються для вимірювання кутової швидкості об'єкта та компенсації гіроскопічного моменту. Одна зі схем компенсаційного тахометра включає датчик моменту, який жорстко пов'язаний з гіродвигуном. Ця схема також називається датчиком кутової швидкості з "електричною" пружиною [17].

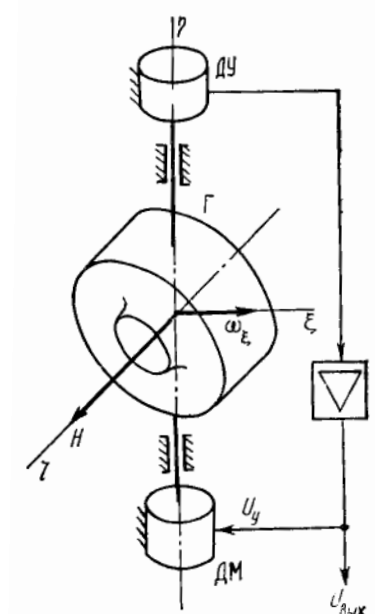


Рис. 1.9. Компенсаційний гіротахометр [17]

У цій схемі компенсуючий момент створюється датчиком моменту, який розташований на осі підвісу гіродвигуна. Алгебраїчна сума моментів навколо осі створює момент повороту гіродвигуна. Управляючий сигнал датчика моменту зчитується з датчика кута. Цей сигнал залежить від кута

повороту гіродвигуна. Зворотний зв'язок між моментом, що розвивається датчиком моменту, і кутом повороту гіродвигуна є від'ємним. Тому ланцюг зворотного зв'язку, який складається з датчика кута, підсилювача і датчика моменту, створює протидію повороту гіродвигуна від положення рівноваги, подібно до ефекту пружини. Тому цю схему називають "електричною" пружиною [17].

Вимірювання величини компенсаційного моменту, який розвивається датчиком моменту, є досить складним. Тому в якості вихідного сигналу приладу використовується електричний сигнал, який керує датчиком моменту. Момент датчика моменту пропорційний управляючому сигналу [17].

1.4.1 Конструкція поплавкового гіроскопу

Поплавковий гіроскоп - це гіроскоп з двома ступенями свободи, де обертання гіроскопа навколо осі карданного підвісу протидіє момент, що пропорційний швидкості обертання гіроскопа. На рисунку 1.10 зображена принципова структурна схема плаваючого інтегруючого гіроскопа в спрощеному вигляді [18].

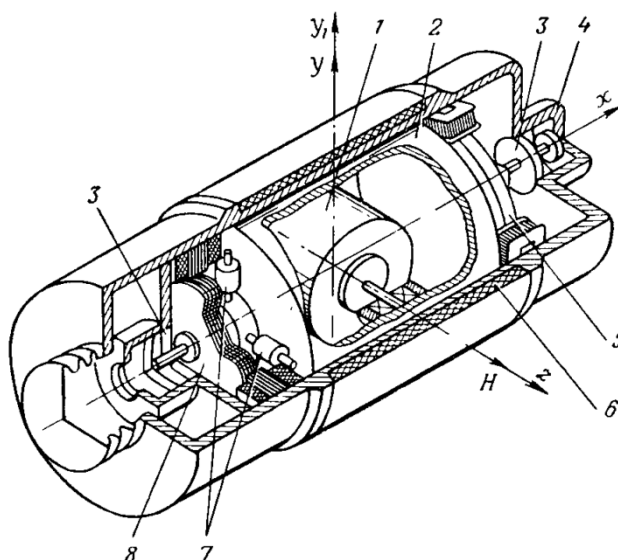


Рис. 1.10 Структурна схема плаваючого гіроскопа: 1-гіромотор; 2-поплавок; 3-підшипники; 4-корпус; 5-датчик моменту; 6-обмотка датчика температури; 7-гайки; 8-датчик кута [19]

Прилад складається з гіромотора, який жорстко закріплений у герметичному циліндричному поплавку. Гіромотор утворює гіровузол. Плаваючий гіровузол встановлений на підшипниках у герметичному корпусі приладу, дозволяючи йому обертатися навколо вихідної осі x_1 . Корпус має циліндричну форму, яка охоплює плаваючий гіровузол, з невеликим зазором між поверхнею корпусу та циліндричною поверхнею поплавка (зазор розміром 0,1-0,2 мм) [18].

Внутрішній простір корпусу заповнений фторвуглеводневою рідиною високої густини (діапазон $\rho = 1,93 \div 1,98$ г/см³) з високим коефіцієнтом

в'язкості. Ця рідина використовується для гідростатичного розвантаження опор плаваючого гіроскопа, захисту опор приладу від ударів і вібрацій, а також для створення демпфуючого моменту. Демпферні функції виконуються зовнішньою поверхнею поплавка, внутрішньою поверхнею корпусу і рідиною в зазорі між ними. В'язкість рідини та розмір зазору підібрані таким чином, щоб потік рідини в зазорі залишався ламінарним практично при будь-якій швидкості обертання плаваючого гіровузла відносно корпусу приладу. Крім того, демпфуючий момент строго пропорційний швидкості обертання поплавка. Для підтримання густини та в'язкості рідини в пристрої передбачено автоматичне регулювання температури [18].

На циліндричну поверхню корпусу пристрою намотана обмотка терморегулятора, яка допомагає забезпечити балансування плаваючого гіровузла. Об'єм плаваючого гіровузла підібраний таким чином, щоб його плавучість в рідині при робочій температурі була близькою до нуля. Це майже повністю розвантажує опори, дозволяючи замінити кулькові підшипники на підшипники кочення і знизити моменти тертя опор до мінімуму [18].

Для уникнення невизначеності моментів, що виникають від поступального прискорення вздовж вихідної осі, плаваючий гіровузол слід ретельно збалансувати. Це досягається співставленням центра ваги плаваючого гіровузла з центром тиску витісненої рідини по осі x_1 . Балансування гіровузла відносно осі x_1 здійснюється за допомогою чотирьох гаєк, які накручені на чотири взаємно перпендикулярних різьбових стержні, закріплених на осі плаваючого гіровузла. Датчик кута використовується для визначення кута повороту плаваючого гіровузла [18].

Датчик моменту плаваючого гіровузла призначений для компенсації постійних моментів невизначеності вздовж вихідної осі приладу та для

створення керуючого моменту відносно вихідної осі гіровузла в режимі стабілізації положення [18].

1.4.2 Математична модель

Двоступеневим називають гіроскоп, який має лише два ступеня вільності повороту відносно основи, на якій він установлений. Окрім ступеня вільності, що забезпечує власне обертання ротора навколо головної осі гіроскопа, такий гіроскоп має можливість обертатися навколо осі, яку будемо називати вимірювальною, оскільки поворот гіроскопа відносно основи може бути безпосередньо вимірюваний тільки навколо цієї осі (рис.1.11.)[20]

Складаючи математичні моделі чутливих елементів, побудованих на основі двоступеневих гіроскопів, необхідно враховувати наступне.

Двоступеневий гіроскоп не підпадає під загальне визначення гіроскопа, оскільки він не забезпечує повної вільності повороту в просторі осі власного обертання ротора. Тому йому не властива жодна з описаних раніше властивостей гіроскопа. Зокрема, він не здійснює нутаційних коливань після удару, не прицесує під дією зовнішнього моменту, змінює свою орієнтацію в просторі при обертанні основи і т. ін. [20]

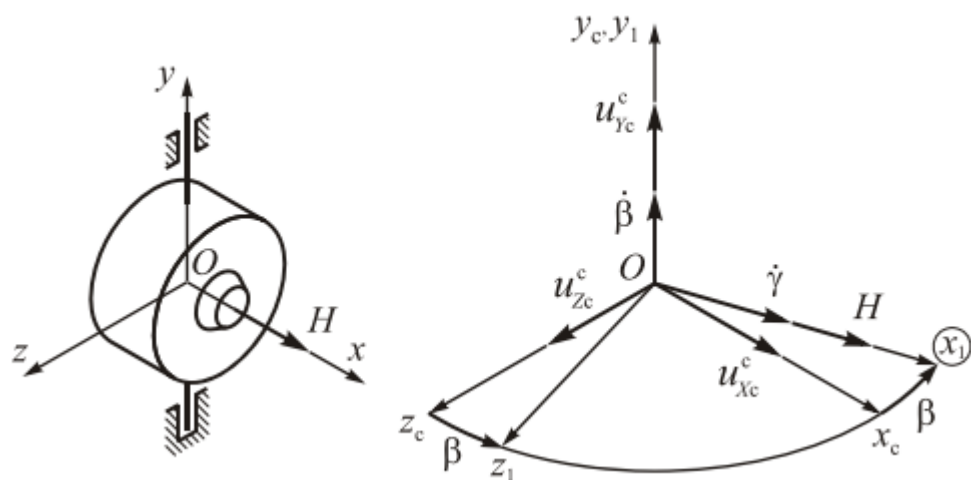


Рис. 1.11. Кінематика двоступеневого гіроскопа

Властивості двоступеневого гіроскопа значно відрізняються від властивостей звичайного (треступеневого) гіроскопа й настільки своєрідні, що це дозволило створити на його основі цілий клас гіроскопічних приладів зі специфічними функціями, що набули широкого застосування на практиці.

Для теоретичного дослідження поведінки двоступеневого гіроскопа не можна користуватися прецесійними (скороченими) рівняннями його руху, а необхідно орієнтуватися на використання повних рівнянь [20].

Припустимо, що основа, на який встановлений гіроскоп, здійснює обертання в інерціальному просторі з кутовою швидкістю u^c , заданою своїми проекціями $u_{x_c}^c, u_{y_c}^c$ і $u_{z_c}^c$ на осі системи координат $x_c y_c z_c$ [20].

Вважатимемо, що двоступеневий гіроскоп являє собою конструкцію з взаємопов'язаних двох тіл – ротора і рамки. Вимірювальну вісь гіроскопа y_1 сумістимо з віссю y_c , а головною віссю гіроскопа вважатимемо вісь x_1 (див. рис. 3). Кут повороту рамки відносно основи позначимо через β [20].

Кінетична енергія T_Σ двоступеневого гіроскопа складається з кінетичних енергій рамки T_1 і ротора T :

$$T_\Sigma = T + T_1.$$

Гіроскоп припускаємо зрівноваженим – центри мас рамки і ротора збігаються з точкою підвісу O гіроскопа, ротор – динамічно симетричним тілом, вісь фігури якого збігається з головною віссю гіроскопа x_1 , а осі $x_1 y_1 z_1$, жорстко зв'язані з рамкою, – головними осями інерції для рамки. [20] За таких умов потенціальну енергію можна вважати нульовою, а кінетична енергія дорівнюватиме:

$$T_\Sigma = \frac{1}{2} \left[\frac{H^2}{J} + (J_e + J_{1y}) \omega_{1y}^2 + (J_e + J_{1z}) \omega_{1z}^2 + (J_e + J_{1x}) \omega_{1x}^2 \right];$$

$$H = J(\dot{\gamma} + \omega_{1x1}),$$

де $\omega_{1x1}, \omega_{1y1}, \omega_{1z1}$ – проекції вектора $\omega_1 = u^c + \dot{\beta}$ кутової швидкості і рамки на осі координат, пов'язані з рамкою. Відповідно до рис. 1 матимемо:

$$\omega_{1X1} = u_{Xc}^c \cos \beta - u_{Zc}^c \sin \beta; \quad \omega_{1Y1} = \dot{\beta} + u_{Yc}^c; \quad \omega_{1Z1} = u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta.$$

Тому кінетична енергія набуде виразу

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{H^2}{J} + (J_e + J_{1Z}) (u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta)^2 + (J_e + J_{1Y}) (\dot{\beta} + u_{Yc}^c)^2 + (J_e + J_{1X}) (u_{Xc}^c \cos \beta - u_{Zc}^c \sin \beta)^2 \right]$$

$$H = J (\dot{\gamma} + u_{Xc}^c \cos \beta - u_{Zc}^c \sin \beta).$$

Застосовуючи формалізм Лагранжа, дістанемо таке диференціальне рівняння двоступеневого гіроскопа:

$$\begin{aligned} & (J_e + J_{1Y}) (\ddot{\beta} + \dot{u}_{Yc}^c) - \\ & - (J_e + J_{1Z} - J_{1Z}) (u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta) (u_{Xc}^c \cos \beta - u_{Zc}^c \sin \beta) + \\ & + H (u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta) = M_{Y1}. \end{aligned}$$

Введемо позначення:

$$J_1 = J_e + J_{1Y}; \quad J_2 = J_e + J_{1Z} - J_{1Z}.$$

Тепер рівняння руху двоступеневого гіроскопа на обертовій основі можна записати в остаточному вигляді:

$$J_1 (\ddot{\beta} + \dot{u}_{Yc}^c) + [H - J_2 (u_{Xc}^c \cos \beta - u_{Zc}^c \sin \beta)] (u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta) = M_{Y1}.$$

Розглянемо двоступеневий гіроскоп, на вимірювальній осі якого встановлено пружину, яка утворює відновлюючий момент (рис. 4) :

$$M_{Y1} = -c\beta,$$

де c – кутова жорсткість пружини. Такий прилад може служити вимірювачем абсолютної кутової швидкості основи, тому його називають гіротахометром (ГТ)[21].

Рівняння руху гіротахометра можна записати так:

$$J_1 \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c\beta = -H_0 u_{Z1}^c - J_1 \dot{u}_{Yc}^c + J_2 u_{X1}^c u_{Z1}^c + M_{Y1}^*.$$

Тут M_{Y1}^* – зовнішній збурювальний момент по вимірювальній осі, тобто момент, який не містить відновлювального M_{Y1} і демпфірувального $M_{Y1}^* = -f \dot{\beta}$ моментів, які враховані в лівій частині [20].

При обертанні основи c постійною кутовою швидкістю ($\dot{u}^c = 0$), відсутності збурювальних моментів ($M_{Y1}^* = 0$) і нехтуванні відцентровим

моментом сил інерції $(J_2 u_{XI}^c u_{ZI}^c)$ положення рівноваги гіротахометра $(\dot{\beta} = 0; \ddot{\beta} = 0)$ визначиться рівністю:

$$\beta^* = -\frac{H_0}{c} (u_{Zc}^c \cos \beta + u_{Xc}^c \sin \beta).$$

За досить жорсткої пружини $c \gg |H_0 u_{\max}|$ значення β^* можна визначити простішою формулою

$$\beta_{i0} = -\frac{H_0}{c} u_{Zc}^c,$$

звідки випливає, що кут повороту головної осі гіротахометра відносно основи несе інформацію про складову абсолютної кутової швидкості основи навколо її осі z_c . [20] У загальному випадку, гіротахометр здійснює навколо цього середнього положення загасаючі (за наявності демпфірувального моменту сил) власні коливання з частотою

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{J}}. [20]$$

РОЗДІЛ 2.

РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1. Вибір конструктивної схеми

Визначимо значення добротності: $\omega_{\xi \max} / \omega_{\xi \min} = 30 / 0.1 = 300$.

Таке значення добротності може бути реалізоване в ГТ із електричною пружиною. Враховуючи значні величини навантажень $\dot{V}_\eta$, $\dot{V}_\zeta$, $\dot{V}_\xi$, великий діапазон змін температури навколишнього середовища при недоступності термостатування, та малому значенні $\dot{\omega}_{\zeta \min} = 0.1$ [град/с] зупинимось на ГТ поплавкового типу з повним зважуванням рухомого вузла [3, 4].

Виходячи з даного температурного діапазону й неприпустимості термостатування, вибираємо рідину з $\gamma_p = 2 \cdot 10^4$ [Н/м³]. Згідно з рекомендаціями вибираємо датчик моменту магнітоелектричного типу з нерухомою котушкою, тому що він застосовується в ГТ середнього та високого класу точності і не має гістерезисного моменту (сили), та датчик кута індукційного типу, тому що вони найбільш підходять для ГТ з електричною пружиною.

2.2. Визначення габаритів ГТ

2.2.1. Розрахунок основних параметрів ГТ

Виходячи з заданої ваги приладу $G_{ГТ} = 4H$, визначаємо його об'єм $V_{ГТ}$ та площу поверхні $S_{ГТ}$. При цьому враховуємо, що для сучасних ГТ з рідинним наповненням середня питома вага $\gamma_{ГТ} = 3 \cdot 10^4 \frac{H}{м^3}$ при використанні зв'язувальної рідини, розрахована на експлуатацію за від'ємних температур, з питомою вагою $\gamma_p = 2 \cdot 10^4 \frac{H}{м^3}$ [3]. Об'єм дорівнює:

$$V_{ГТ} = \frac{G_{ГТ}}{\gamma_{ГТ}} = \frac{4}{3 \cdot 10^4} = 1.33 \cdot 10^{-4} [м^3] = 133 [см^3]; \quad (2.1)$$

Раціонально спроектований ГТ має вигляд циліндра, довжина якого $L_{ГТ}$ приблизно в 2,5 рази перевищує його діаметр $D_{ГТ}$

$$D_{ГТ} = \sqrt[3]{\frac{4V_{ГТ}}{2.5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1.33 \cdot 10^{-4}}{2.5 \cdot \pi}} = 0.041 \cdot [м] \approx 4.1 [см]; \quad (2.2)$$

$$L_{ГТ} = 2.5 \cdot D_{ГТ} = 0.1 [м] = 10 [см]; \quad (2.3)$$

Площа поверхні ГТ буде:

$$S_{ГТ} = 3 \cdot \pi \cdot D_{ГТ}^2 = 3 \cdot 3.14 \cdot 0.041^2 = 0.0158 [м^2] = 158 [см^2]; \quad (2.4)$$

По площині $S_{ГТ}$, максимальній температурі навколишнього середовища

$t_{сmax}$ (зазвичай 60^0C), максимально допустимій робочій температурі приладу

$t_{рmax}$ (не вище $70-75^0C$) визначимо допустиму потужність, яка може виділятися елементами ГТ:

$$P_{ГТдоd} = \alpha \cdot \kappa_1 \cdot S_{ГТ} (t_{рmax} - t_{сmax}), \quad (2.5)$$

де $\kappa_1 = 1.2$ - коефіцієнт, що враховує теплопередачу через елементи кріплення ГТ до об'єкта.

$$P_{ГТдоd} = 10 \cdot 1.2 \cdot 1.58 \cdot 10^{-2} \cdot (75^0 - 60^0) [Вт] = 2.844 [Вт];$$

$$P_{ГТ} = 0.9 \cdot 2.844 = 2.56 [Вт]. \quad (2.6)$$

Тепер розподілимо потужність між гіродвигуном та датчиком моменту приладу. При цьому врахуємо, що потужність, яка виділяється іншими елементами гіротахометра (датчик кута, віброопори), для раціонально спроектованого приладу не перебільшує 10% від загальної потужності.

2.2.2 Вибір гіродвигуна

Обираємо гіромотор симетричної конструкції зі стальним ротором та частотою обертання 24000 об/хв.. Середовище – гелій, тиск 300 мм рт. ст., тоді

$$D_{ГМ} = (0.7 \div 0.75) \cdot D_{ГТ}; \quad (2.7)$$

$$D_{ГМ} = 0.7 \cdot 20 = 14 [см];$$

Результати обчислень при виборі гіродвигуна заносу в розрахункову таблицю 1. Для раціонального вибору типу гіродвигуна виберемо їх декілька з різними кінетичними моментами: $H = 2.5; 2; 1.5; 1; 0.75; 0.5 [H \cdot м \cdot с]$.

1) $H = 2.5 [H \cdot см \cdot с]$;

Для визначення маси гіромотора скористаємось графіком (Рис.2.1).

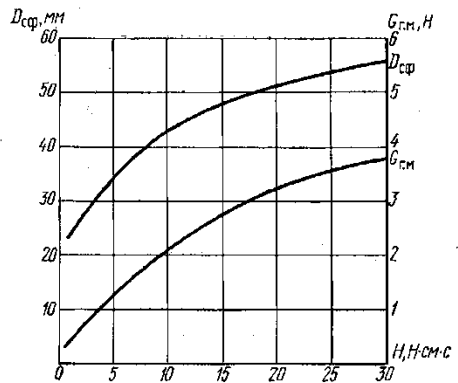


Рис. 2.1. Залежність діаметра і ваги гіромоторів від величини кінетичного (сталевий ротор, частота обертання 24000 об/хв..)

На графіку $G_{ГМ} = 0.8[H]$, але згідно з каталогу $G_{ГМ} = 0.65[H]$. Надалі для розрахунку будемо використовувати вагу гіромотора з каталогу.

Для визначення величини потужності гіромотора скористаємось графіком 2 (рис.2.2).

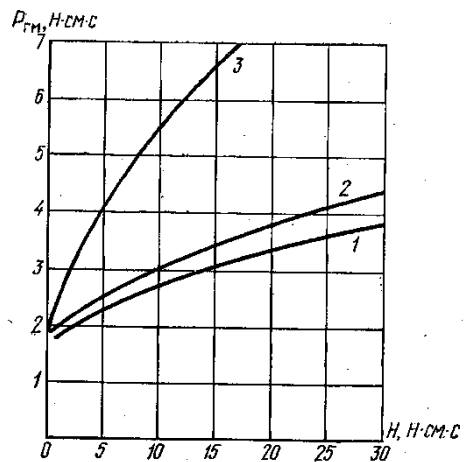


Рис.2.2 Залежність виділеної потужності гіромотора від величини кінетичного моменту

$$P_{ГМ} = 2.2 \text{ [Вт]};$$

Визначимо вагу датчика моменту за допомогою графіку (Рис.2.3).

Спочатку розрахуємо $M_{\max}$ і $P_{ДМ}$ [4]:

$$P_{ДМ} = 0.9 \cdot P_{ГТ} - P_{ГМ} = 0.9 \cdot 2.95 - 2.2 = 0.455 \text{ [Вт]};$$

$$0.7 \cdot M_{\max} = 0.7 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0.7 \cdot 2.5 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.915 \text{ [Н} \cdot \text{см]};$$

$$\frac{0.7 \cdot M_{\max}}{\sqrt{P_{ДМ}}} = 0.915 / 0.6745 = 1.36;$$

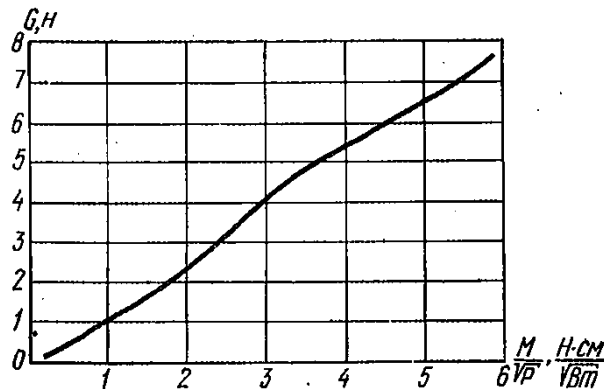


Рис.2.3 Графік залежності ваги датчика моменту від відношення $M / \sqrt{P}$

$$G_{ДМ} = 3.5 \text{ [H]};$$

Формула визначення ваги поплавкового вузла для приладів с датчиками, які мають рухому магнітну систему:

$$G_{ПВ} = 1.1 \cdot (G_{ГМ} + G_{ДМ}); \quad (2.8)$$

$$G_{ПВ} = 1.1 \cdot (0.65 + 3.5) = 4.565 \text{ [H]}.$$

Визначимо об'єм поплавкового вузла:

$$V_{ПВ} = G_{ПВ} / \gamma_p \quad (2.9)$$

$$V_{ПВ} = 4.565 / 2 \cdot 10^4 = 2,2825 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3\text{]} = 228 \text{ [см}^3\text{]},$$

де $\gamma_p = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{H}}{\text{м}^3}$ - питома вага ГТ.

Виконаємо такі ж самі розрахунки для інших гіромоторів, складемо розрахункову таблицю з отриманими значеннями та виберемо гіромотор, що найкраще задовольнить умови технічного завдання.

$$2) H = 2[H \cdot cM \cdot c]; G_{\Gamma M} = 0.6[H]; P_{\Gamma M} = 2 [BT];$$

$$P_{\Delta M} = 0.9 \cdot P_{\Gamma T} - P_{\Gamma M} = 0.9 \cdot 2.95 - 2 = 0.65 [BT];$$

$$0,7 \cdot M_{\max} = 0.7 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0.7 \cdot 2 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.73 [H \cdot cM];$$

$$\frac{0,7 \cdot M_{\max}}{\sqrt{P_{\Delta M}}} = 0.73 / 0.8 = 0.92;$$

$$G_{\Delta M} = 2 [H];$$

$$G_{\Delta M} + G_{\Gamma M} = 2.6 [H];$$

$$G_{\Pi Y} = 1.1 \cdot (G_{\Gamma M} + G_{\Delta M}) = 1.1 \cdot 2.6 = 2.86 [H];$$

$$V_{\Pi Y} = G_{\Pi Y} / \gamma_p = 2.86 / 2 \cdot 10^4 = 1.43 \cdot 10^{-4} [M^3] = 143 [cM^3];$$

$$3) H = 1[H \cdot cM \cdot c]; G_{\Gamma M} = 0.55[H]; P_{\Gamma M} = 1.9 [BT]$$

$$P_{\Delta M} = 0.9 \cdot P_{\Gamma T} - P_{\Gamma M} = 0.9 \cdot 2.95 - 1.9 = 0.75 [BT];$$

$$0.7 \cdot M_{\max} = 0.7 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0.7 \cdot 1 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.37 [H \cdot cM];$$

$$\frac{0.7 \cdot M_{\max}}{\sqrt{P_{\Delta M}}} = 0.37 / 1.155 = 0.317;$$

$$G_{\Delta M} = 0.75 [H];$$

$$G_{\Delta M} + G_{\Gamma M} = 1.3 [H];$$

$$G_{\Pi Y} = 1.1 \cdot (G_{\Gamma M} + G_{\Delta M}) = 1.1 \cdot 1.3 = 1.43 [H];$$

$$V_{\Pi Y} = G_{\Pi Y} / \gamma_p = 1.43 / 2 \cdot 10^4 = 0.715 \cdot 10^{-4} [M^3] = 71.5 [cM^3];$$

$$4) H = 0.75[H \cdot cM \cdot c]; G_{\Gamma M} = 0.4[H]; P_{\Gamma M} = 2 [BT];$$

$$P_{\Delta M} = 0.9 \cdot P_{\Gamma T} - P_{\Gamma M} = 0.9 \cdot 2.95 - 2 = 0.655 [BT];$$

$$0.7 \cdot M_{\max} = 0.7 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0.7 \cdot 0.75 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.275 [H \cdot cM];$$

$$\frac{0.7 \cdot M_{\max}}{\sqrt{P_{\Delta M}}} = 0.275 / 0.8093 = 0.34;$$

$$G_{\Delta M} = 0.8 [H];$$

$$G_{\Delta M} + G_{\Gamma M} = 1.2 [H];$$

$$G_{IV} = 1.1 \cdot (G_{IM} + G_{DM}) = 1.1 \cdot 1.2 = 1.32 [H];$$

$$V_{IV} = G_{IV} / \gamma_p = 1.32 / 2 \cdot 10^4 = 0,66 \cdot 10^{-4} [M^3] = 66 [cm^3];$$

$$5) H = 0.5 [H \cdot cm \cdot c]; G_{IM} = 0.35 [H]; P_{IM} = 1.7 [BT];$$

$$P_{DM} = 0.9 \cdot P_{IT} - P_{IM} = 0.9 \cdot 2.95 - 1.7 = 0.955 [BT];$$

$$0.7 \cdot M_{max} = 0.7 \cdot H \cdot \omega_{\zeta max} = 0.7 \cdot 0.5 \cdot 30 \cdot \pi / 180 = 0.183 [H \cdot cm];$$

$$\frac{0.7 \cdot M_{max}}{\sqrt{P_{DM}}} = 0.183 / 0.9772 = 0.187;$$

$$G_{DM} + G_{IM} = 0.55 [H];$$

$$G_{IV} = 1.1 \cdot (G_{IM} + G_{DM}) = 1.1 \cdot 0.55 = 0.605 [H];$$

$$V_{IV} = G_{IV} / \gamma_p = 0.605 / 2 \cdot 10^4 = 0,3025 \cdot 10^{-4} [M^3] = 30 [cm^3];$$

Таблиця 1. Вибір гіромотора та розрахунок параметрів датчика моменту

H, [H·cm·c]	P _{IM} , [BT]	G _{IM} , [H]	0.7·M _{max} , [H·cm]	P _{DM} , [BT]	0.7·M _{max} / √P _{DM} , [H·cm/√Bm]	G _{DM} , [H]	G _{DM} + G _{IM} ≤ 0.7·G _{IT} = 2.8, [H]	V _{IV} ≤ 0.45V _{IT} = 0.75·10 ⁻⁴ M ³
2.5	2.2	0.65	0.915	0.455	1.36	3.5	4.15	2.2825·10 ⁻⁴
2	2	0.6	0.73	0.65	0.92	2	2.6	1.43·10 ⁻⁴
1	1.9	0.55	0.37	0.674	0.317	0.75	1.3	0.715·10 ⁻⁴
0.75	2	0.4	0.275	0.655	0.34	0.8	1.2	0.66·10 ⁻⁴
0.5	1.7	0.35	0.183	0.694	0.187	0.2	0.55	0.3025·10 ⁻⁴

Гіромотор з кінетичним моментом $H = 1 [H \cdot cm \cdot c]$ найкраще задовольняє вимоги технічного завдання.

2.2.3 Розрахунок поплавка рухомого вузла

$$G_{DM} = 0.2 [H];$$

Вага поплавка (для рухомої магнітної системи):

$$G_{ПУ} = 1.1 \cdot (G_{ГМ} + G_{DM}); \quad (2.10)$$

$$G_{ПУ} = 1.1 \cdot 1.3 = 1.43 [H];$$

Об'єм поплавка:

$$V_{ПУ} = \frac{G_{ПУ}}{\gamma_p}; \quad (2.11)$$

$$V_{ПУ} = \frac{1.43}{2 \cdot 10^4} = 0.715 \cdot 10^{-4} [M^3] = 71.5 [CM^3];$$

Діаметр поплавка:

$$D_{ПУ} = 0.8 \cdot D_{ГТ}; \quad (2.12)$$

$$D_{ПУ} = 0.8 \cdot 4.1 = 3.28 [CM];$$

Довжина поплавка:

$$L_{ПУ} = \frac{4 \cdot V_{ПУ}}{\pi \cdot D_{ПУ}^2}; \quad (2.13)$$

$$L_{ПУ} = \frac{4 \cdot 71.5}{3.14 \cdot 3.28^2} = 8.46 [CM];$$

2.2.4 Розрахунок основних параметрів датчика моменту

Розміри датчика моменту:

$$V_{DM} = \frac{G_{DM}}{\gamma_{DM}}; \quad (2.14)$$

$$V_{DM} = \frac{0.75}{6.25 \cdot 10^4} = 0.12 \cdot 10^{-4} [M^3] = 12 [CM^3],$$

де $\gamma_{DM} = 6.25 \cdot 10^4 \left[\frac{H}{M^3} \right]$ - середня питома вага датчика моменту.

Діаметр датчика моменту:

$$D_{DM} = 0.8 \cdot D_{ГТ}; \quad (2.15)$$

$$D_{DM} = 0.8 \cdot 4.1 = 3.28 [CM];$$

Довжина датчика моменту:

$$L_{\text{ДМ}} = \frac{4 \cdot V_{\text{ДМ}}}{\pi \cdot D_{\text{ПВ}}^2}; \quad (2.16)$$

$$L_{\text{ДМ}} = \frac{4 \cdot 12}{\pi \cdot 3.28^2} = 0.42 [\text{см}].$$

2.2.5 Опис розробленої конструкції

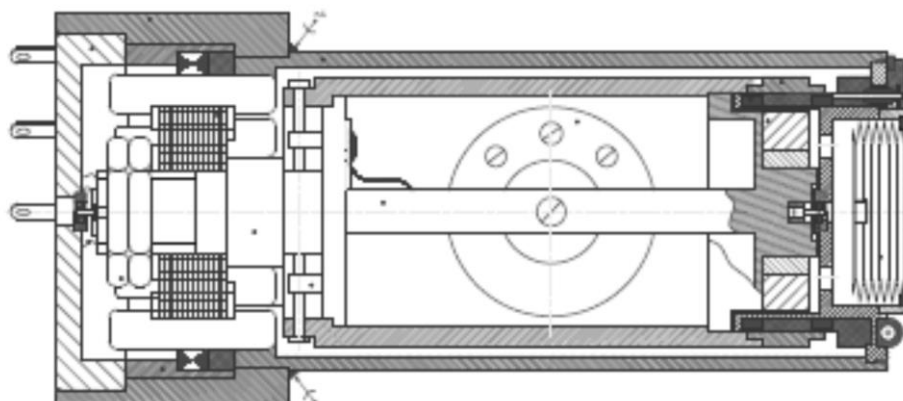


Рис.2.4. Принципова схема компенсаційного гіротахометра

Головною складовою датчика кутової швидкості є гіродвигун, який жорстко закріплений в рамці гіровузла таким чином, що вісь обертання ротора гіродвигуна перпендикулярна до повздовжньої вісі гіровузла. На гіровузлі розташовані ротор трансформаторного датчика кута повороту та каркас з котушками, які входять до складу датчика моменту (електричної пружини).

Датчик кутової швидкості складається з корпусу (10), в якому розташований гіровузол (1). Регулювальні гайки (16), які служать для точного балансування приладу, закріплені спеціальним гвинтом (17). З метою зменшення моменту тертя в опорах, прилад заповнений рідиною. До корпусу приладу кріплять магніт датчика моменту, з іншої сторони в корпус вставляють вузол датчика кута, який складається з пакета статора (4) та пакета ротора (5). До вузла датчика кута підводять гнучкі струмопідводи (7). Струмопідводи одним кінцем через контакти припаюють до контактів на

гіровузлі. Корпус приладу закривається з однієї сторони кришкою (8), а з іншої - сильфоном (14) і припаюється по всьому діаметру. Вузол сильфону необхідний для компенсації температурного розширення рідини, яка заповнює внутрішню частину датчика.

2.2.6 Вибір опор

Виходячи з отриманого значення кінетичного моменту ($H = 1 \text{ Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$), визначаю допустимий рівень діючих на рухомий вузол шкідливих моментів:

$$M_{\text{шк}} \leq \omega_{\zeta \min} \cdot H = \frac{1 \cdot \pi \cdot 0.1}{180} = 17.45 \cdot 10^{-4} [\text{Н} \cdot \text{см}]; \quad (2.17)$$

$$\omega_{\zeta \min} = \frac{\omega_{\zeta \min}}{1800} = 0.00000097 \text{ град} / \text{с}$$

$$M_{\text{шк}} = \sqrt{M_{\text{ТР.}}^2 + M_{\text{ТР.РЕГ.}}^2} + \Delta M_{\text{шк}}. \quad (2.18)$$

$$M_{\text{ТР.}} = M^* + K_{\text{ТР.ПАД.}} + K_{\text{ТР.ВІС.}},$$

де $M_{\text{ТР.}}, M_{\text{ТР.РЕГ.}}, M^*$ ($M^*=0$, оскільки проектується поплавковий ГТ) – моменти тертя, які діють на рухомий вузол в процесі експлуатації, регулювання та які не залежать від навантаження і регулювання ГТ.

Обчислення залишкової маси (відношення залишкової ваги рухомого вузла до прискорення сили тяжіння):

$$m_{\text{зАЛ.}} = \beta_p \cdot \left(\frac{t_{\text{сmax}} - t_{\text{сmin}}}{2} \right) \cdot \frac{G_{\text{П.У}}}{g}; \quad (2.19)$$

$$m_{\text{зАЛ.}} = \frac{0.1}{100} \cdot \frac{60^\circ + 60^\circ}{2} \cdot \frac{1.43}{9.8} = 0.00875 [\text{кг}],$$

де $\beta_p = 0,1 \text{ \%} / \text{град.}$ – об'ємний коефіцієнт розширення рідини.

Обчислення реакції опор:

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}; \quad (2.20)$$

де R_1 – осьова складова реакції опор.

$$R_1 = m_{\text{зАЛ.}} \cdot \dot{V}_\xi; \quad (2.21)$$

$$R_1 = 0.00875 \cdot 1 \cdot g = 0.0875 [\text{Н}];$$

R_2 – радіальна складова реакції опор.

$$R_2 = \left| m_{\text{з.ал.}} \cdot \dot{V}_\xi = 0.00875 \cdot 1 \cdot g = 0.0875 [\text{H}] \right|;$$

де $L = 0.75 \cdot L_{\text{ГТ}} = 0.75 \cdot 11 = 8 (\text{см})$ – відстань між підшипниками

$$R_2 = \left| \frac{2 \cdot H \cdot \omega_\xi}{L} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 60 \cdot \pi}{7.5 \cdot 180} = 0.2791 [\text{H}] \right|;$$

$$R_2 = 0.2791 [\text{H}];$$

$$\text{Тоді } R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} = \sqrt{0.0875^2 + 0.2791^2} = 0.29 [\text{H}],$$

$$M_{\text{ТР.}} = K_{\text{ТР.ПАД.}} \cdot R + K_{\text{ТР.ОС.}} \cdot R_1 = K_{\text{ТР.ПАД.}} \cdot 0.29 + K_{\text{ТР.ОС.}} \cdot 0.0875; \quad (2.22)$$

Перевантаження приладу при регулюванні дорівнює 1g. Регулювання будемо проводити при $t_{\text{н.п.}}$, а значить що $M_{\text{ТР.ПЕР.}} \approx 0$ (в порівнянні з $M_{\text{ТР.}}$ приладу в умовах експлуатації). Тоді:

$$M_{\text{ШК.}} = M_{\text{ТР.}} + \Delta M_{\text{ШК.}} \approx K_{\text{ТР.ПАД.}} \cdot 0.29 + K_{\text{ТР.ОС.}} \cdot 0.0875;$$

$$\omega_{\xi \min} \geq \frac{M_{\text{ШК.}}}{H} = K_{\text{ТР.ПАД.}} \cdot 0.29 + K_{\text{ТР.ОС.}} \cdot 0.0875;$$

Враховуючи $\omega_{\xi \min} = 0.1 \text{ } ^\circ/\text{с}$ та прийняв $K_{\text{ТР.ПАД.}} \approx K_{\text{ТР.ОС.}}$, отримую:

$$\begin{aligned} K_{\text{ТР.ПАД.}} &< 0.265 \\ K_{\text{ТР.ОС.}} &< 0.265 \end{aligned}; K_{\text{ТР.ПАД.}}$$

Тільки рівні та $K_{\text{ТР.ОС.}}$ можуть бути забезпечені за допомогою камневих опор. Обравши діаметр цапфи $d_{\text{ц}} = 0,7$ мм, отримаємо коефіцієнт тертя $\mu_1 = 0.037$.

Але, враховуючи, що наявність змащення та вібрації, які здійснюються гіродвигуном, приводять до зменшення тертя у 3 – 5 разів, можна прийняти за опори рухомого вузла приладу каменеві підшипники з $d_{\text{ц}} = 0,7$ мм.

2.2.7 Визначення температури перегріву

Температура нульової плавучості рухомого вузла $t_{\text{н.п.}}$ дорівнює:

$$t_{\text{н.п.}} = 0,5 \cdot (t_{\text{сmax}} + t_{\text{сmin}}) + t_{\text{ПЕРЕГР.}}, \quad (2.23)$$

$$\text{де } t_{\text{ПЕРЕГР.}} = \frac{(P_{\text{ДМ}} + P_{\text{ГМ}} + 0,1 \cdot P_{\text{ГТ}})}{\kappa_1 \cdot S_{\text{ГТ}} \cdot \alpha} = \frac{0,674 + 1,9 + 0,1 \cdot 2,56}{1,2 \cdot 8 \cdot 0,0158} = 18,66^\circ \text{C} \approx 19^\circ \text{C}.$$

Оскільки я вибрала гіродвигун за допомогою розрахункової таблиці 1, то підрахована температура перегріву $t_{\text{ПЕРЕГР.}} = t_{p\text{max}} - t_{c\text{max}}$ є перевіркою правильності підрахунків.

Максимальна та мінімальна температури корпусу приладу відповідно будуть:

$$\begin{aligned} t_{p\text{max}} &= t_{c\text{max}} + t_{\text{ПЕРЕГР.}} = 60^\circ + 19^\circ = 79^\circ \text{C} \\ t_{p\text{min}} &= t_{c\text{min}} + t_{\text{ПЕРЕГР.}} = -60^\circ + 19^\circ = -41^\circ \text{C} \end{aligned} \quad ; \quad (2.24)$$

Таким чином температура нульової плавучості рухомого вузла буде:

$$t_{\text{Н.П.}} = 0,5 \cdot (t_{c\text{max}} + t_{c\text{min}}) + t_{\text{ПЕРЕГР.}} = 0,5 \cdot (60^\circ - 60^\circ) + 19^\circ = 19^\circ \text{C};$$

Перевірка правильності підрахунків:

$$t_{\text{ПЕРЕГР.}} = t_{p\text{max}} - t_{c\text{max}} = 79^\circ - 60^\circ = 19^\circ \text{C}. \quad (2.25)$$

Отже, підрахунки правильні.

Крутизну тракту розвантаження визначаю, виходячи з наступних умов:

а) задана частотність ГТ

$$k = J \cdot n_0^2; \quad (2.26)$$

$$\text{З формули } \delta_{\text{ДИН}} = -\frac{\omega_{\text{MAX}}^4}{2 \cdot n_0^4}, \quad \text{де } \omega_{\text{MAX}} = 5[\text{Гц}] = 31,4[1/\text{с}]; \quad \delta_{\text{ДИН}} = 0,05$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} n_0^4 &= -\frac{\omega_{\text{MAX}}^4}{2 \cdot \delta_{\text{ДИН}}} = -\frac{(31,4)^4}{2 \cdot 0,05}; \\ n_0 &= \sqrt[4]{-\frac{(31,4)^4}{2 \cdot 0,05}} = 55,838[1/\text{с}]. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Момент інерції рухомого вузла в десять разів більший ніж момент інерції гіродвигуна:

$$J = 10 \cdot J_{\text{ГД}}, \quad (2.28)$$

де $J_{гд} = \frac{H}{\dot{\gamma}}$, тут $\dot{\gamma} = 24000 / 60 = 400 [1/с]$ - кутова швидкість обертання ротора

гіродвигуна; $H = 1 [Н \cdot см \cdot с]$ – кінетичний момент гіродвигуна.

$$J_{гд} = \frac{1}{400} = 2.5 \cdot 10^{-3} [Н \cdot см \cdot с^2]; \quad (2.29)$$

Момент інерції рухомого вузла буде:

$$J = 10 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} = 25 \cdot 10^{-3} [Н \cdot см \cdot с^2]; \quad (2.30)$$

Таким чином $k = J \cdot n_0^2 = 25 \cdot 10^{-3} \cdot (55.838)^2 = 77.95 [Н \cdot см \cdot с/рад]$.

б) допустима похибка від перехресної кутової швидкості

$$\text{З формули } \delta\omega_\eta = \frac{h_\zeta(\omega_{\eta\max}) - h_\zeta(\omega_{\eta\min})}{h_\zeta(\omega_\eta = 0)} \cdot 100\% \approx \frac{H(\omega_{\eta\max} - \omega_{\eta\min})}{k} \cdot 100\%,$$

де $\omega_{\eta\max}$ і $\omega_{\eta\min}$ - максимальне та мінімальне значення перехресної кутової швидкості, отримуємо:

$$k \geq \frac{H \cdot \omega_{\eta\max}}{[\delta\omega_\eta]_{\text{доп}}} \cdot 100\%, \quad (2.31)$$

$$\text{де } H \cdot \omega_{\eta\max} = 1 \cdot 30 \text{ } ^\circ/\text{с} = \frac{1 \cdot 60 \cdot \pi}{180} = 0.525;$$

$$[\delta\omega_\eta]_{\text{доп}} = 1\%.$$

Таким чином:

$$k \geq \frac{0.525}{1} \cdot 100\% = 52.5 [Н \cdot см \cdot с/рад].$$

в) допустима нелінійність та нестабільність вихідної характеристики ГТ з врахуванням нелінійності та нестабільності підсилювача – перетворюючих пристроїв.

Якщо продиференціювати $h_\zeta = \frac{H \cdot k_{n.n.} \cdot R_{em}}{k_{n.n.} + k_n + H \cdot \omega_\eta}$ по $k_{n.n.}$ та прийнявши

$$\omega_\eta = \omega_{\eta\max}, \text{ отримуємо } \frac{\partial h_\zeta}{\partial k_{n.n.}} = \frac{H \cdot R_{em} \cdot (H \cdot \omega_{\eta\max} + k_n)}{(k_{\partial.м} \cdot k_{n.n.} + k_n + H \cdot \omega_{\eta\max})^2}.$$

Переходячи до приросту та враховуючи $k_{n.n.} \cdot k_{\partial.м.} \gg k_n + H \cdot \omega_{\eta \max}$, записую нерівність $\delta h_{\zeta \text{ доп}} \leq \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\% = \frac{H \cdot \omega_{\eta \max} + k_n}{k_{\partial.м.} \cdot k_{n.n.}} \cdot \delta k_{n.n.} \cdot 100\%$,

Звідки:

$$k = (H \cdot \omega_{\eta \max} + k_n) \cdot \frac{\delta k_{n.n.}}{\delta h_{\zeta \text{ доп}}} \quad (2.32)$$

Зазвичай датчик кута ГТ та підсилювач – перетворювач забезпечують в сумі $\delta k_{n.n.} \approx 5\%$.

$k_n = \frac{3 \cdot E \cdot J}{l^3}$ - жорсткість підвісу, де $J = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$ - момент інерції перерізу струмопідводу, $d = 0.05$ [мм] = $5 \cdot 10^{-5}$ [м],

$$J = \frac{3.14 \cdot (5 \cdot 10^{-5})^4}{32} = 61.32 \cdot 10^{-20} [\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2], \quad (2.33)$$

$E = 13 \cdot 10^{10}$ Па – модуль Юнга(матеріал мідь),

$\delta h_{\zeta \text{ доп}} = 0,05\%$, $l = 10$ мм = 0,01 м – довжина струмопідводів.

$$k_n = \frac{3 \cdot 13 \cdot 10^{10} \cdot 61.32 \cdot 10^{-20}}{(0.01)^3} = 0.239; \quad (2.34)$$

Таким чином:

$$k = \left(1 \cdot \frac{30 \cdot \pi}{180} + 0.239 \right) \cdot \frac{5\%}{0.05\%} = 128.57 [\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с/рад}]. \quad (2.35)$$

З трьох отриманих значень k (а, б, в) вибираємо найбільше. Це варіант (в) $k \geq 128.57 [\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с/рад}]$.

2.2.8 Визначення максимального кута

Максимальний кут відхилення рухомого вузла визначається за такою формулою:

$$\beta_{\max} = \frac{H \cdot \omega_{\zeta \max}}{k} = \frac{1 \cdot 60 \cdot \pi}{180 \cdot 128.57} = 0.0081 [\text{рад}]. \quad (2.36)$$

2.2.9 Визначення коефіцієнта демпфірування

Для поплавкового приладу складова загального коефіцієнта демпфірування, яка здійснюється за рахунок руху рідини в циліндричному зазорі приладу,

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_c^3 \cdot l_n \cdot \mu_p}{\delta}, \quad (2.37)$$

де $R_c = 1.64$ (см) - середній радіус поплавка;

$l_n = 8.46$ (см) - довжина поплавка;

$\mu_p = 0.01 \cdot 10^{-5}$ Н·с/см² - коефіцієнт динамічної в'язкості;

δ - зазор між поплавком та корпусом, він повинен бути 0.1 ... 0.4 мм.

Визначимо B для таких значень $\delta = 0.1 \dots 0.4$:

Таблиця 2. Розрахунок коефіцієнта демпфування

δ , мм	B , $H \cdot \text{см} \cdot \text{с} / \text{рад}$
0.1	0.00023
0.2	0.00012
0.3	0.00008
0.4	0.00006

Вибираємо найменший зазор $\delta = 0.01$ см для якого коефіцієнт демпфірування $B = 0.00023$.

2.3 Аналіз похибок приладу

Рівняння руху ЧЕ відносно корпусу приладу має вигляд:

$$I_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + k\beta = H\omega_\xi \cos \beta - H\omega_\zeta \sin \beta - I_y \cdot \dot{\omega}_\eta + (I_z - I_x)(\omega_\xi^2 \sin 2\beta - \omega_\zeta^2 \sin 2\beta + \omega_\xi \omega_\zeta \cos 2\beta) - M_{DM} - k\beta - \varepsilon_0 k_y k_{\partial y} - M_{T0} \text{sign} \beta - m(\rho_x w_y - \rho_y w_x). \quad (2.38)$$

З рівняння можна побачити, що статична похибка ГТ визначається наявністю шкідливих моментів, що діють на його рухомий вузол і перешкоджають його руху, викликаному гіроскопічним моментом.

Причинами похибок є:

- Моменти-перешкоди, які не залежать від вимірюваної кутової швидкості ω_ξ , або залежні від неї нелінійно;
- Співмножник $\cos \beta$ в виразі корисного моменту $H \cdot \omega_\xi \cdot \cos \beta$;
- Члени, які залежать від похідних $\dot{\beta}$ і $\ddot{\beta}$ вихідної величини;
- Нестабільність статичного коефіцієнта передачі ГТ.

Скористаємося розповсюдженою класифікацією похибок ГТ, та розглянемо окремо методичні і інструментальні, мультиплікативні і адитивні похибки.

До методичних похибок відносяться:

1. Похибки від впливу гіроскопічного моменту $H \cdot \omega_\xi \cdot \cos \beta$ від перехресної кутової швидкості:

Формула абсолютної похибки від адитивної перешкоди - $H \cdot \omega_\xi \cdot \cos \beta$, записана в розмірності вихідної величини β

$$\Delta_{\omega_\eta}^\beta = -\frac{H^2}{k^2} \omega_\xi \omega_\eta = -\frac{1^2}{128.57^2} \cdot \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)^2 = -6.63 \cdot 10^{-5} [rad], \quad (2.39)$$

Формула похибок, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{\omega_\eta}^\beta = \frac{\Delta_{\omega_\eta}^\beta}{K} = -\frac{H}{k} \omega_{\xi \max} \omega_{\eta \max} = -\omega_{\eta \max} \beta_{\max}; \quad (2.40)$$

$$\Delta_{\omega_\eta}^\beta = -\frac{30 \cdot 0.0081 \cdot \pi}{180} = -0,0043 [rad / c],$$

де $K = \frac{H}{k}$ - статичний коефіцієнт передачі.

Формулу максимального значення приведеної похибки отримаємо, якщо формулу абсолютної похибки в розмірності β поділимо на значення $\beta_{\max}$ чи формулу абсолютної похибки в розмірності ω_{ξ} поділимо на $\omega_{\xi \max}$:

$$\delta_{\omega\eta} = \frac{\Delta_{\omega\eta}^{\beta}}{\beta_{\max}} = \frac{\Delta_{\omega\eta}^{\omega_{\xi}}}{\omega_{\xi \max}} = -\frac{H}{k} \omega_{\eta \max} = -\frac{\omega_{\eta \max}}{\omega_{\xi \max}} \beta_{\max} = -\beta_{\max}; \quad (2.41)$$

$$\delta_{\omega\eta} = -0,0081 = 0,81\%,$$

де $\omega_{\eta \max} = \omega_{\xi \max} = \omega_{\zeta \max} = 30^{\circ}$.

2. Похибка від моменту відцентрових сил:

Формула максимальної абсолютної похибки:

$$\Delta_{\theta}^{\beta} = \frac{J_z - J_x}{c} \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\eta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\eta \max} \right] \quad (2.42)$$

$$\text{де } J_z = \frac{H}{\Omega_0} = \frac{1}{400 \cdot 2\pi} = 1.59 \cdot 10^{-4} [\text{кг} \cdot \text{м}^2];$$

$$J_x = 0.5 \cdot J_z = 0.5 \cdot 1.59 \cdot 10^{-4} = 0.79 \cdot 10^{-4} [\text{кг} \cdot \text{м}^2];$$

$$\Delta_{\theta}^{\beta} = \frac{J_z - J_x}{k} \cdot \omega_{\xi \max} \cdot \omega_{\eta \max} = \frac{(1.59 - 0.79) \cdot 10^{-4}}{128.57} \cdot \left(\frac{60 \cdot \pi}{180} \right)^2 = 0.01 \cdot 10^{-4} [\text{рад}].$$

Формула похибки, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{\beta}^{\omega\eta} = \frac{J_y - J_x}{H} [(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\eta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\eta \max}]; \quad (2.43)$$

$$\Delta_{\theta}^{\omega\eta} = \frac{J_y - J_x}{H} \cdot \omega_{\xi \max} \cdot \omega_{\eta \max}; \quad (2.44)$$

$$\Delta_{\theta}^{\omega\eta} = \frac{(1.59 - 0.79) \cdot 10^{-4}}{1} \cdot \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)^2 = 0.44 \cdot 10^{-4} [\text{рад} / \text{с}].$$

3. Похибка від впливу співмножника $\cos \beta$ в основному гіроскопічному моменті:

Формула максимальної абсолютної похибки:

$$\Delta_{\cos \beta}^{\beta} = \frac{H}{k} (\cos \beta_{\max} - 1) \omega_{\xi \max} = -\frac{H}{2k} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^3}{2k^3} \omega_{\xi \max}^3; \quad (2.45)$$

$$\Delta_{\cos \beta}^{\beta} = -\frac{1^3}{2 \cdot (128.57)^3} \cdot \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)^3 = 2.7 \cdot 10^{-7} [\text{рад}].$$

Формула похибки, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{\cos \beta}^{\omega_{\xi}} = \frac{\Delta_{\cos \beta}^{\beta}}{K} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^2}{2k^2} \omega_{\xi \max}^3; \quad (2.46)$$

$$\Delta_{\cos \beta}^{\omega_{\xi}} = -\frac{1^2}{2 \cdot (128.57)^2} \cdot \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)^3 = 3.5 \cdot 10^{-5} [\text{рад} / \text{с}].$$

Формула максимального значення приведеної відносної похибки:

$$\delta_{\cos \beta} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 = -\frac{H^2}{2k^2} \omega_{\xi \max}^2; \quad (2.47)$$

$$\delta_{\cos \beta} = -\frac{1^2}{2 \cdot (128.57)^2} \cdot \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)^2 = 3.31 \cdot 10^{-5}.$$

Зменшення впливу співмножника $\cos \beta$ досягається обмеженням $\beta_{\max}$.

Динамічна похибка:

Формулу абсолютної частотної похибки можна отримати як різницю ординат АЧХ:

$$\Delta_{\omega}^{\beta} = [A(\omega) - A(0)] \omega_{\xi \max}. \quad (2.48)$$

Для максимального значення цієї похибки з урахуванням і обмеженням $\omega_{\max} \ll \omega_0$ отримаємо наступну формулу:

$$\Delta_{\omega}^{\beta} = \frac{H \omega_{\xi \max}}{J_y \omega_0^2} \left[\frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{\max}^2)^2 + 4h^2 \omega_{\max}^2}} - 1 \right]; \quad (2.49)$$

Формула похибок, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{\omega}^{\omega_{\xi}} = \frac{\Delta_{\omega}^{\beta}}{K} = \omega_{\xi \max} \left[\frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{\max}^2)^2 + 4h^2 \omega_{\max}^2}} - 1 \right]; \quad (2.50)$$

Формула приведеної відносної похибки:

$$\delta_{\omega} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{\max}^2)^2 + 4h^2 \omega_{\max}^2}} - 1; \quad (2.51)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J_x}} = \sqrt{\frac{128.57}{0.79 \cdot 10^{-4}}} = 1275 [1/c]. \quad (2.52)$$

Для $h=0.707$:

$$\delta_\omega = \frac{1275^2}{\sqrt{(1275^2 - (14 \cdot \pi)^2)^2 + 4 \cdot 0.107^2 (14 \cdot \pi)^2}} - 1 = 0.0011;$$

$$h = \frac{B}{2J_x} = \frac{0.00023}{2 \cdot 0.79 \cdot 10^{-4}} = 1.46;$$

$$\delta_\omega = \frac{1275^2}{\sqrt{(1275^2 - (14 \cdot \pi)^2)^2 + 4 \cdot 1.46^2 (14 \cdot \pi)^2}} - 1 = 0.23;$$

При виконанні умови $2h^2 = \omega_0^2$

$$\delta_\omega = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^4 + \omega_{\max}^4}} - 1 = \frac{1275^2}{\sqrt{1275^4 + (14 \cdot \pi)^4}} - 1 = -0.01.$$

До інструментальних похибок відносяться:

Похибка від моменту сил сухого тертя:

Формула максимальної абсолютної похибки від моменту сил сухого тертя в одиницях вихідної величини β можна записати у вигляді:

$$\Delta_{M_T}^\beta = \pm \frac{M_T}{k}; \quad (2.53)$$

Формула похибки, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{M_T}^{\omega_\xi} = \frac{\Delta_{M_T}^\beta}{K} = \pm \frac{M_T}{H}; \quad (2.54)$$

Формула максимальної приведеної відносної похибки:

$$\delta_{M_T} = \pm \frac{M_T}{H \omega_{\xi \max}}; \quad (2.55)$$

M_T зменшується при застосуванні поплавкового підвісу з рідинним демпфером, використанням пружного підвісу рухомої частини приладу.

$$M_T = K_{TP.PAD.} \cdot R + K_{TP.BIC.} \cdot A = 0.265 \cdot 0.29 + 0.265 \cdot 0.0875 = 0.1;$$

$$\delta_{M_T} = \pm \frac{0.1180}{1.60 \cdot \pi} = 0.096.$$

Похибка від моменту дебаланса:

Формула абсолютної похибки:

$$\Delta_{\rho}^{\beta} = -\frac{m(\rho_z w_x - \rho_x w_z)}{k}; \quad (2.56)$$

$$w_x = w_z = 4g;$$

$$\rho_x = 0;$$

$$\rho_z = \frac{P \cdot a^2 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot l}, \quad (2.57)$$

де $P = m \cdot \vec{w} = \rho_n V_n \vec{w}$ – зосереджене навантаження;

$\rho_n = 7.8 \cdot 10^{-3} [\text{кг} / \text{см}^3]$ – густина поплавка, виготовленого зі сталі;

$V_n = 71.5 [\text{см}^3]$ – об'єм поплавка;

$E = 2.1 \cdot 10^{11} [\text{Па}]$ – модуль пружності для сталі;

$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$ – осьовий момент інерції цапфи;

$l = 3.7 (\text{см})$ – довжина вала;

$d = 0.07 (\text{см})$ – діаметр цапфи;

$$a = b = \frac{l}{2} = \frac{3.7}{2} = 1.85 [\text{см}].$$

$$J = \frac{\pi \cdot (0.07)^4}{64} = 0.12 \cdot 10^{-5} [\text{кг} \cdot \text{см}^2]; .$$

$$P = 0.00875 \cdot 4g = 0.343 [\text{Н}]; .$$

Тоді

$$\rho_z = \frac{0.343 \cdot (1.85)^4}{3 \cdot 2.1 \cdot 10^{11} \cdot 0.12 \cdot 10^{-5} \cdot 3.7} = 1.436 \cdot 10^{-6} [\text{см}];$$

$$\Delta_{\rho}^{\beta} = -\frac{m\rho_z w_x}{k} = -\frac{\rho_n V_n \rho_z w_x}{k} = -\frac{7.8 \cdot 10^{-3} \cdot 71.5 \cdot 1.436 \cdot 10^{-6} \cdot 4g}{128.57} = 0.24 \cdot 10^{-6} [rad].$$

Формула похибки, що розглядається, в розмірності величини, що вимірюється:

$$\Delta_{\rho}^{\omega_{\xi}} = \frac{\Delta_{\rho}^{\beta}}{K} = -\frac{\rho_n V_n \rho_z w_x}{H} = \frac{7.8 \cdot 10^{-3} \cdot 71.5 \cdot 1.436 \cdot 10^{-6} \cdot 4g}{1} = 3.14 \cdot 10^{-6} [rad / c].$$

Формула максимальної приведеної відносної похибки:

$$\delta_{\rho} = -\frac{m(\rho_z w_x - \rho_x w_z)}{H\omega_{\xi \max}} = -\frac{\rho_n V_n \rho_z w_x}{H\omega_{\xi \max}} = -\frac{7.8 \cdot 10^{-3} \cdot 71.5 \cdot 1.436 \cdot 10^{-6} \cdot 4g}{1 \cdot 60 \cdot \pi / 180} = 3 \cdot 10^{-5}.$$

Для зниження впливу прискорень основи на точність приладу потрібно підвищувати точність початкового балансування, використовувати підшипники з малим зазором на головній осі гіроскопа, запроваджувати симетричну конструкцію гіродвигуна і матеріалів з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення, більшу і, по можливості, рівну жорсткість елементів конструкції вздовж осей x і z .

3. Похибка від нестабільності статичного коефіцієнта передачі:

Формула абсолютної похибки:

$$\Delta K = \frac{\dot{\gamma}}{k_n l_n^2} \Delta J_0 + \frac{J_0}{k_n l_n^2} \Delta \dot{\gamma} - \frac{J_0 \dot{\gamma}}{k_n^2 l_n^2} \Delta c_n - \frac{2J_0 \dot{\gamma}}{k_n l_n^3} \Delta l_n; \quad (2.58)$$

де ΔJ_0 - приріст осьового моменту інерції; $\Delta \dot{\gamma}$ - приріст швидкості обертання синхронного гіродвигуна; Δl_n - зміна довжини кронштейна.

Відносний приріст коефіцієнта передачі:

$$\delta K = \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta J_0}{J_0} + \frac{\Delta \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} - \frac{\Delta k_n}{k_n} - \frac{2\Delta l_n}{l_n} = \frac{\Delta J_0}{J_0} + \frac{\Delta \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}}, \quad (2.59)$$

де

$$\Delta J_0 = J_{op} - J_{он} = \frac{m}{2}(R_0 + \alpha\Delta t)^2 - \frac{mR_0^2}{2} = \frac{m}{2}(R_0^2 + 2R_0\alpha\Delta t + \alpha^2\Delta t^2 - R_0^2) \approx mR_0\alpha\Delta t$$

$$\frac{\Delta J_0}{J_0} = \frac{mR_0\alpha\Delta t}{mR_0^2/2} = \frac{2\alpha\Delta t}{R_0} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{1.75} = 12,57 \cdot 10^{-6}; \quad (2.60)$$

$$R = \sqrt{\frac{2J_x}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.79 \cdot 10^{-4}}{8.75 \cdot 10^{-3}}} = 0.134(м);$$

$$\frac{\dot{\Delta\gamma}}{\dot{\gamma}} = \frac{0,1\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} = 0,1; \quad (2.61)$$

$$\delta K = \frac{\Delta J_0}{J_0} + \frac{\dot{\Delta\gamma}}{\dot{\gamma}} = 12,57 \cdot 10^{-6} + 0,1 = 0,1.$$

4. Похибка від нестабільності напруги живлення датчика кута:

Максимальне значення похибки в розмірності вихідної величини:

$$\Delta_{U_{II}}^U = k\Delta U_{nmax}\beta_{max}$$

де ΔU_{nmax} максимальний приріст напруги по відношенню до його номінального значення.

Ця ж похибка, але в одиницях кута β :

$$\Delta_{U_{IImax}} = \frac{\Delta_{U_{II}}^U}{kU_n} = \frac{\Delta U_{nmax}}{U_n}\beta_{max}; \quad (2.62)$$

Максимальне значення відносної приведеної похибки

$$\delta U_n = \frac{\Delta U_{nmax}}{U_n} = 0.1\%; \quad (2.63)$$

Тобто дорівнює відносному приросту напруги живлення.

Для усунення сильного впливу нестабільності напруги живлення датчика кута, часто використовують додаткові стабілізатори. Компенсаційні ГТ даного недоліку не мають.

ВИСНОВОК

При написанні дипломного проекту було оглянуто декілька схем побудови вимірювачів кутової швидкості. Для рішення поставленої задачі, а саме – розрахунку і проектування датчика кутової швидкості з заданими вихідними параметрами (маса датчика, максимальна і мінімальна вимірювана ним кутова швидкість, максимальна допустима похибка), обрано схему ДКШ з електричною пружиною.

У проекті наведено обґрунтування вибраної конструктивної схеми. Наводиться опис розробленої конструкції, розрахунок та вибір необхідних елементів конструкції. Також проведено розрахунок інструментальних та динамічних похибок. На основі цих розрахунків розроблено складальне креслення ДКШ компенсаційного типу.

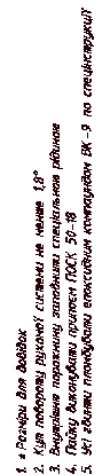
Створена часткова модель приладу у середовищі AutoCAD.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Nockson, «Ring laser gyroscope at MAKS-2011 airshow», *Wikimedia Commons*, 2001. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ring_laser_gyroscope_at_MAKS-2011_airshow.jpg#metadata (дата звернення 19, травень 2023).
- [2] Laserkreisel[Online]. Доступний у: <https://de.wikipedia.org/wiki/Laserkreisel>
- [3] Ю. А. Странський, «Шляхи покращення вихідних параметрів волоконно-оптичного гіроскопу», Магістерська дисертація, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019. Дата звернення: 19, Червень 2023. [Online]. Доступний у: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30573/1/Stranskyi_magistr.pdf
- [4] S. Merlo, M. Norgia, i S. Donati, «Fiber gyroscope principles», в *Handbook of Fibre Optic Sensing Technology*, J. M. López-Higuera, Ред., John Wiley & Sons Ltd, 2000, с. 23. Дата звернення: 19, Червень 2023. [Online]. Доступний у: http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2004_DavidGameiro_FilipeCarvalho/Sensores/Girosc%C3%B3pio/optic%20gyro%20%20principle%20%20donati.pdf
- [5] vibrating structure gyroscope. [Online]. Доступно у: https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating_structure_gyroscope#cite_ref-NEC_ceramic_2-0
- [6] D. Rozelle, «The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets», *Advances in the Astronautical Sciences*, вип. 134, с. 1157–1178, Січ 2009, Дата звернення: 19, Червень 2023. [Online]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/279909300_The_Hemispherical_Resonator_Gyro_From_Wineglass_to_the_Planets
- [7] Sagem, «Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)», *Wikimedia Commons*, 2015. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hemispherical_Resonator_Gyroscope_\(HRG\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hemispherical_Resonator_Gyroscope_(HRG).jpg) (дата звернення 19, Червень 2023).

- [8] A. D. Meyer i D. Rozelle, «Milli-HRG inertial navigation system», *Gyroscopy and Navigation*, вип. 3, с. 24–29, Жов 2012, doi: 10.1109/PLANS.2012.6236860.
- [9] MEMS Sensors: Conversion of the Physical World to the Digital World
Доступний у: https://cdn.mikroe.com/blog/2016/04/od_3130_2_1421091586.jpg
- [10] W. A. Gill, I. Howard, I. Mazhar, i K. McKee, «A Review of MEMS Vibrating Gyroscopes and Their Reliability Issues in Harsh Environments», *Sensors*, вип. 22, вип. 19, 2022, doi: 10.3390/s22197405.
- [11] B. Pattnaik, «Piezoelectric Gyroscopes», *Dr Birajashis*, 2006.
http://www.geocities.ws/dr_birajashis/piezoelectric_gyroscope.html (дата звернення 19, Червень 2023).
- [12] Piezoelectric gyroscopes. [Online]. Доступний у:
http://www.geocities.ws/dr_birajashis/piezodevice2_box01d.gif
- [13] W. Thompson, «Piezoelectric Vibratory Gyroscopes». <https://competition.adesignaward.com/design-encyclopedia.php?e=383647> (дата звернення 19, Червень 2023).
- [14] Schematic view of a novel vibrating ring gyroscope developed by General Motors.
Доступний у: https://www.mdpi.com/sensors/sensors-22-07405/article_deploy/html/images/sensors-22-07405-g015-550.jpg
- [15] W. Amin Gill, I. Howard, I. Mazhar, i K. McKee, « Micro-Electromechanical Systems Vibrating Gyroscopes», *Scholarly Community Encyclopedia*, 2022.
<https://encyclopedia.pub/entry/29635> (дата звернення 19, Червень 2023).
- [16] M. N. Nguyen, N. S. Ha, L. Q. Nguyen, H. M. Chu, i H. N. Vu, «Z-Axis Micromachined Tuning Fork Gyroscope with Low Air Damping», *Micromachines (Basel)*, вип. 8, вип. 2, 2017, doi: 10.3390/mi8020042.
- [17] Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов. - Киев: Высшая школа. Главное издательство, 1986.
- [18] V. Karachun, V. Mel'nick, I. Korobiichuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, i S. Kobzar, «The Additional Error of Inertial Sensors Induced by Hypersonic Flight Conditions», *Sensors*, вип. 16, вип. 3, 2016, doi: 10.3390/s16030299.

- [19] Structural diagram of the floating gyroscope, Доступно у :
https://www.mdpi.com/sensors/sensors-16-00299/article_deploy/html/images/sensors-16-00299-g001.png
- [20] Ю. Ф. Лазарєв, П. М. Бондар. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації. Підручник. – К.: , 2009. – 626 с

[illegible]

