

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 2023 р.

**Дипломний проєкт
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: «Датчик кутової швидкості на основі двоступеневого гіроскопа»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-91

Демчук Захар Романович

Керівник:

к.т.н., ст. викладач.

Сапегін Олександр Миколайович

Рецензент:

Доц. каф. ПБ, к.т.н., доцент.

Шевченко Вадим Володимирович

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

Студент _____

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 проєкт студенту**

_____ Демчуку Захару Романовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту _____ Датчик кутової швидкості на основі двоступеневого гіроскопу

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 проєкту « _____ » _____ 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту:

діапазон вимірювання ± 60 %/с; поріг чутливості 0,1 %/с; перехресне прискорення 4g; похибка вимірювання – 0,05%; похибка від перехресного прискорення - 0,2%; динамічна похибка приладу 0,3%; вага 5Н; кінетичний момент до 2 н·м температурний діапазон експлуатації $+50^{\circ} - 50^{\circ}$ 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 дипломного проєкту	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел за темою ДП	05.05.2023	
2.	Огляд та класифікація ДКШ	15.05.2023	
3.	Розрахунок параметрів КДКШ	25.05.2023	
4.	Створення креслень	10.06.2023	
5.	Оформлення рукопису ДП, підготовка до захисту	12.06.2023	

Студент

(підпис)Захар ДЕМЧУК
(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проєкту

(підпис)Олександр САПЕГІН
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект представлений на 49 аркушах, використані джерела з 9 найменувань; у роботі наведено 8 рисунки, одна таблиця, один складальний кресленик, деталювання та специфікація.

Даний проект спрямований на створення ефективного та точного пристрою для вимірювання обертових рухів. У першому розділі здійснено огляд різних типів гіроскопів, включаючи механічні гіроскопи, вібраційні гіроскопи, волоконно-оптичні гіроскопи та гіроскопи MEMS.

У другому розділі проведено розрахунково-конструкторський аналіз ангулярного швидкісного датчика з використанням поплавкового типу. Результатом проекту є розроблений прототип датчика з виконаними розрахунками.

ABSTRACT

The diploma project consists of 49 pages and includes references from 9 sources. It includes 8 figures, one table, one assembly drawing, detailing, and specifications.

This project aims to create an efficient and accurate device for measuring angular motions. The first chapter provides an overview of various types of gyroscopes, including mechanical gyroscopes, vibrational gyroscopes, fiber-optic gyroscopes, and MEMS gyroscopes.

The second chapter presents a computational and design analysis of an angular velocity sensor using a float-type mechanism. The project concludes with the development of a prototype sensor accompanied by the necessary calculations.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ABSTRACT.....	5
ВСТУП.....	7
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1. Огляд датчиків кутової швидкості.....	8
1.2. Типи датчиків кутової швидкості	10
1.3. Сфери застосування.	22
Висновок до Розділу 1	23
Розділ 2. РОЗРАХУНКОВО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	25
2.1. Вибір конструктивної схеми.....	25
2.2. Визначення габаритів датчика кутової швидкості.....	26
2.3. Розрахунок методичних похибок.....	38
Висновок по Розділу 2	44
ВИСНОВОК.....	45
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	46
ДОДАТОК А.....	47

ВСТУП

Вимірювання кутової швидкості відіграє вирішальну роль у багатьох технологічних додатках, включаючи навігаційні системи, робототехніку та аерокосмічну техніку. Точне вимірювання кутової швидкості забезпечує точне відстеження руху, стабілізацію та керування в динамічних системах. Для досягнення надійного вимірювання кутової швидкості використовуються передові датчики, які називаються датчиками кутової швидкості або гіроскопами. Ці датчики надають цінні дані про швидкість обертання або кутову швидкість об'єкта чи системи.

Датчики кутової швидкості набули значного значення завдяки своїй здатності вимірювати обертальні рухи з високою точністю та чутливістю. Ці датчики знаходять широке застосування в різних сферах, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), супутникові системи позиціонування, системи віртуальної реальності та промислова автоматизація. У БПЛА, наприклад, датчики кутової швидкості забезпечують стабільне керування польотом, планування траєкторії та уникнення перешкод. Так само в супутникових системах позиціонування датчики кутової швидкості сприяють точному визначенню положення, орієнтації супутника та підтримці орбіти.

Основною метою цієї дипломної роботи є дослідження та розробка датчика кутової швидкості на основі двоступеневого гіроскопа. Двоступеневий гіроскоп — це передова конструкція, яка пропонує кілька потенційних переваг перед традиційними гіроскопічними технологіями. Досліджуючи дизайн, реалізацію та продуктивність двоступеневого датчика кутової швидкості на основі гіроскопа, ми прагнемо внести свій внесок у вдосконалення технології вимірювання кутової швидкості.

Розділ 1.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Огляд датчиків кутової швидкості

Датчики кутової швидкості, також відомі як гіроскопи, — це пристрої, які використовуються для вимірювання швидкості обертання або кутової швидкості об'єкта чи системи. [9] Ці датчики надають цінні дані про обертіві рухи, забезпечуючи точне відстеження руху, стабілізацію та контроль у різних програмах. Датчики кутової швидкості знаходять застосування в різноманітних сферах, включаючи навігаційні системи, робототехніку, аерокосмічну промисловість, автомобільну промисловість, побутову електроніку тощо.

Гіроскопом називається пристрій, що складається з колеса або диска, встановленого таким чином, що він може швидко обертатися навколо осі, яка сама по собі може змінювати напрямок. [4] У систему з трьох рухомих концентричних кілець (кардановий підвіс) зазвичай поміщають гіроскоп (рис. 1.1а)

Можливість орієнтації осі гіроскопа $A'A$ у будь-якому напрямі забезпечує маховик та кільця, які можуть вільно обертатися навколо взаємно перпендикулярних осей $A'A$, $B'B$ і $D'D$ (рис. 1.1б). Завдяки цьому гіроскоп називається вільним гіроскопом (якщо він знаходиться у кардановому підвісі). Точкою опори гіроскопа називають одну з точок яка є закріпленою. На рис. 1.2 показаний гіроскоп в якому точкою опори виступає спільний центр кілець. Нарешті, гіроскоп називають зрівноваженим у випадку якщо центр мас маховика та точка опори збігається.

1.2. Типи датчиків кутової швидкості

1.2.1 *Механічні гіроскопи.*

Механічні гіроскопи, також відомі як традиційні гіроскопи, — це пристрої, що складаються з колеса або диска, встановленого таким чином, що вони можуть швидко обертатися навколо осі, яка сама по собі може змінювати напрямок. На орієнтацію осі не впливає нахил кріплення, тому гіроскопи можна використовувати для забезпечення стабільності або підтримки орієнтовного напрямку в навігаційних системах, автоматичних пілотах і стабілізаторах.

Ось кілька ключових моментів про механічні гіроскопи:

Принцип роботи:

Механічні гіроскопи працюють на основі концепції збереження кутового моменту. Відповідно до цього принципу обертова маса або обертове колесо прагне зберегти свою орієнтацію та протистоїть змінам свого кутового положення. Коли гіроскоп обертається, він створює крутний момент, перпендикулярний вхідному обертальному руху. Цей крутний момент можна виміряти та використовувати для визначення кутової швидкості.

Компоненти:

Механічні гіроскопи складаються з кількох ключових компонентів. Основним елементом є ротор, який зазвичай складається з обертової маси або обертового колеса. Ротор встановлений на наборі карданних підвісів, що дозволяє йому вільно обертатися по кількох осях. Існують також підшипники або шарніри, які підтримують обертання ротора, мінімізуючи тертя та забезпечуючи плавний рух. Крім того, механічні гіроскопи містять механізми для виявлення крутного моменту або змін у гіроскопічному русі.

Застосування:

Механічні гіроскопи використовуються в різних сферах застосування. У навігаційних системах вони відіграють вирішальну роль у визначенні орієнтації та кутового положення транспортних засобів, кораблів і літаків. Вони широко використовуються в літакових приладах, таких як індикатори орієнтації та індикатори курсу, щоб надати пілотам важливу інформацію про крен, тангаж і поворот літака. Механічні гіроскопи також використовувалися для стабілізації платформ для камер, телескопів та інших пристроїв, які потребують стабільного позиціонування.

Обмеження:

Хоча механічні гіроскопи широко використовуються, вони мають певні обмеження. Вони відносно громіздкі та чутливі до зовнішніх сил і вібрацій. З часом у механічних гіроскопів може спостерігатися дрейф, тобто поступова зміна їхньої потужності через різні фактори, зокрема механічні недоліки, коливання температури та тертя підшипників. Цей дрейф вимагає періодичного калібрування або корекції для підтримки точності.

Досягнення:

З розвитком технологій з'явилися нові типи гіроскопів, наприклад MEMS-гіроскопи та волоконно-оптичні гіроскопи. Ці технології пропонують такі переваги, як менший розмір, менше енергоспоживання та покращена стабільність порівняно з механічними гіроскопами. Однак механічні гіроскопи все ще знаходять деякі застосування, де цінується їх міцність, простота та надійність.

Загалом, механічні гіроскопи мають довгу історію та відіграють важливу роль у багатьох застосуваннях, які вимагають точного вимірювання кутової швидкості та орієнтації. У той час як нові технології розширили можливості гіроскопічного зондування, механічні гіроскопи продовжують використовуватися в певних областях, де їх унікальні характеристики є перевагами.

1.2.2. Датчик кутової швидкості з механічною пружиною

Датчик кутової швидкості з механічною пружиною — це тип датчика, який використовується для вимірювання кутової швидкості або швидкості обертання об'єкта. Він використовує принципи механічних пружин для виявлення та кількісного визначення обертального руху. Їх застосовують при умові, що відношення $\omega\zeta_{max}/\omega\zeta_{min}$ має значення не більше $(0,1 \div 0,5) \cdot 10^3$, а також немає жорстких вимог щодо забезпечення стабільності нуля та стабільності вихідної лінійності характеристики ДКШ. Доволі чималий обсяг вимірюваних швидкостей у датчику кутової швидкості можна забезпечити завдяки вибору пружини належної жорсткості. У випадках, коли вимагається висока надійність приладу при великих вібраціях і лінійних перевантаженнях, і необхідно досягти низького порогу чутливості ($\omega\zeta_{min} \leq 0,1$ град/с), застосовують поплавкові датчики кутової швидкості з повним або частковим зважуванням поплавкового вузла. Останні називаються "датчиками кутової швидкості з рідинним заповненням". Вони мають менші розміри, є більш економічними та простішими з технологічної точки зору. Що стосується точносних характеристик, то датчики кутової швидкості з рідинним заповненням знаходяться між "сухими" датчиками і поплавковими датчиками з повним зважуванням. Наявність рідини знижує коефіцієнт тертя у підшипниках, сприяє погашенню примусових коливань гіровузла, спричинених динамічним дисбалансом ротора гіродвигуна, покращує відведення теплової енергії від гіродвигуна і датчиків кута і моменту. Це може дозволити збільшити допустиму щільність струму, зменшити знос потенціометра та забруднення його контактної поверхні, а також покращити вібростійкість токопідводів.

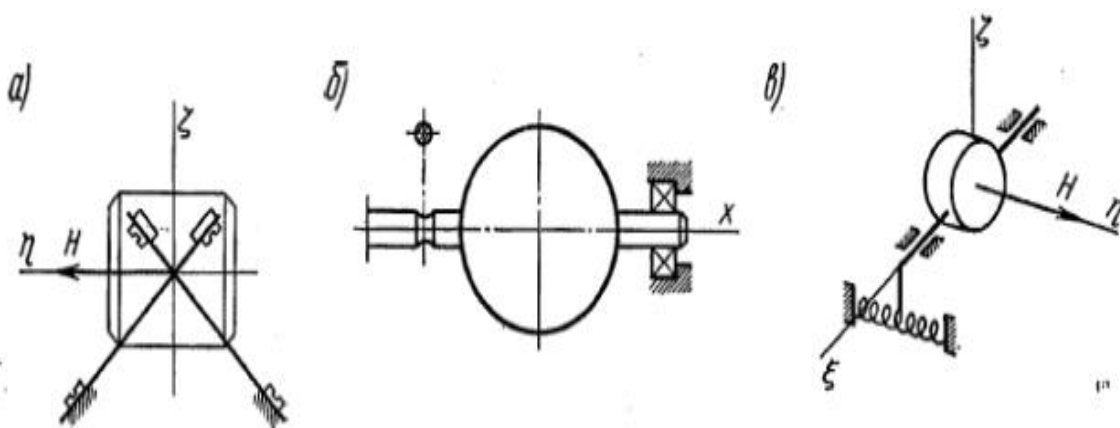


Рис. 1.3. ДКШ з підвісом на пендельферах (а), з торсіоном і підшипником з гладкою втулкою (б) і з гвинтровою пружиною (в)

Вказана схема на рис.1.3 забезпечує підвіску гіровузла без тертя. Вона передбачає, що вісь підвісу гіровузла пряма і проходить через точки перетину реакцій, прикладених пендельферами до гіровузла. Ідеальна регулювання підвісу передбачає співпадіння цих точок перетину з точками перетину пар пендельферів, і центр тяжіння гіровузла лежить на прямій, що з'єднує ці точки (гіровузол збалансований).

Проте, в процесі вимірювання кутової швидкості гіровузол повертається, що приводить до деформації пендельферів, а отже, точка перетину реакцій зміщується. Це призводить до розбалансування гіровузла. У даній схемі з трьома пендельферами таке розбалансування не враховано.

Схема на рис.1.3, яка використовує підшипник з гладкою втулкою, є поширеною і дійсно забезпечує мале "сухе" тертя. У цій схемі торсіон виконує роль радіального і осьового підшипників, а також пружини. Завдяки гладкій втулці, рух підшипника відбувається з мінімальним опором і тертям.

У деяких випадках, для забезпечення більшої радіальної і осьової жорсткості при одночасному збереженні низької жорсткості на скручування, використовують торсіон у вигляді хрестовини. Це дозволяє покращити стійкість і точність вимірювання в умовах великих вібраційних і лінійних перевантажень.

Так, схема на рис. 1.3, яка використовує два підшипника і торсіон, є популярною через свою простоту у виготовленні і збиранні. Вона може бути

зібрана зі стандартних деталей, що полегшує процес виробництва. Крім того, ця схема добре працює в умовах великих перевантажень завдяки використанню двох підшипників, які забезпечують додаткову міцність і стабільність підвісу.

Одна з переваг цієї схеми полягає в тому, що вона не вимагає точного регулювання, як в схемі з пендельфедерами. Також не потрібно виконувати складний і якісний торсіон. Це спрощує процес налаштування і забезпечує стабільну роботу приладу без потреби постійного регулювання.

3. Поплавковий гіроскоп.

Для зменшення дрейфу за рахунок зменшення моменту тертя в осях рамки застосовується зважування гіроузла в рідині (поплавковий гіроскоп).

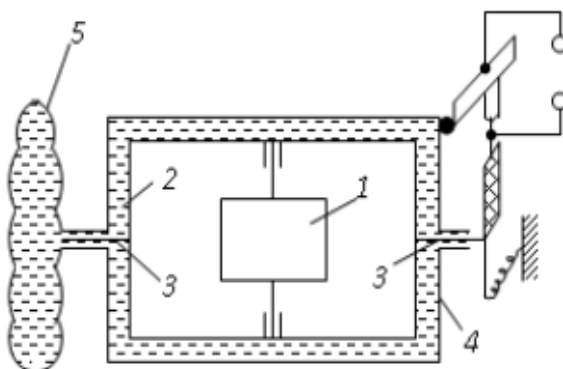


Рис. 1.4. Принципова схема поплавкового гіроскопа. [3]

Схема поплавкового гіроскопа, яка зображена на рис. 1.4, має наступну принципову схему. Ротор гіроскопа 1 знаходиться у рамці 2, яка має форму герметичного циліндра. Обсяг циліндра рамки підбирається таким чином, щоб досягти повного зважування рамки, що дозволяє зняти навантаження з осей рамки 3 і зменшити момент тертя в підшипниках.

Для забезпечення необхідного ступеня заспокоєння важливим є правильний вибір зазорів між циліндром і корпусом 4.

У схемі також використовується гофрована коробка 5, яка компенсує зміни обсягу і питомої ваги рідини зі зміною температури. Це допомагає підтримувати сталі параметри рідини і запобігає впливу температурних змін на точність та надійність роботи гіроскопа.

В цілому, схема поплавкового гіроскопа забезпечує стабільну роботу і зменшує негативний вплив зовнішніх факторів, таких як момент тертя і зміна температури, на точність і надійність вимірювань.

1.2.3 Вібраційні гіроскопи.

Вібраційні гіроскопи є типом датчика кутової швидкості, який використовує ефект Коріоліса для вимірювання обертальних рухів. Ці гіроскопи покладаються на вібрацію певних структур і результуючі сили Коріоліса для визначення кутової швидкості.

Ось кілька ключових моментів про вібраційні гіроскопи:

Принцип роботи:

Вібраційні гіроскопи працюють на основі ефекту Коріоліса, який стверджує, що на вібруючий об'єкт, який зазнає обертального руху, буде діяти сила, перпендикулярна як його швидкості, так і осі обертання. Нехай два підвішених вантажі вібрують на площині у МЕМС-гіроскопі з частотою ω_r . Тоді при повороті гіроскопа виникне коріолісове прискорення

$$\vec{a}_c = -2(\vec{v} \times \vec{\Omega})$$

де $\vec{v}$ — швидкість і $\vec{\Omega}$ — кутова частота повороту гіроскопа.

Горизонтальна швидкість вантажа, що коливається, визначається як $X_{ip}\omega_r \cos(\omega_r t)$, а положення вантажа у площині — $X_{ip}\omega_r \sin(\omega_r t)$. В результаті, рух поза площиною y_{op} , що зумовлений поворотом гіроскопа, описується виразом:

$$y_{op} = \frac{F_c}{k_{op}} = \frac{2m\Omega X_{ip}\omega_r \cos(\omega_r t)}{k_{op}}, \quad (1.1)$$

де m — маса вантажа, який коливається,

k_{op} — коефіцієнт жорсткості пружини у напрямку, перпендикулярному площині,

Ω — величина поворота в площині перпендикулярно руху вантажа.

Компоненти:

Вібраційні гіроскопи складаються з кількох основних компонентів. Основним елементом є вібраційна структура, яка може бути механічною масою, пристроєм мікроелектромеханічної системи (MEMS) або п'єзоелектричним кристалом. Ця структура призначена для коливань з певною частотою. Гіроскоп також містить датчики, такі як ємнісні або п'єзоелектричні датчики, для виявлення відхилення, викликаного ефектом Коріоліса. Схеми формування сигналу та електроніка використовуються для обробки виходу датчика та обчислення кутової швидкості.

Застосування:

Вібраційні гіроскопи зазвичай використовуються в різних додатках, зокрема в інерційних вимірювальних одиницях (IMU). IMU використовуються в таких пристроях, як дрони, смартфони, ігрові пристрої та навігаційні системи. Вібраційні гіроскопи дозволяють точно вимірювати кутову швидкість, що важливо для відстеження руху, оцінки орієнтації та стабілізації. Вони також використовуються в промислових програмах для робототехніки, систем стабілізації платформи та керування рухом.

Переваги:

Вібраційні гіроскопи мають кілька переваг. Вони компактні, легкі та споживають низьку енергію, що робить їх придатними для інтеграції в невеликі пристрої та портативну електроніку. Вони можуть забезпечувати точні вимірювання кутової швидкості в широкому діапазоні та є відносно стійкими до зовнішніх факторів, таких як коливання температури та магнітні поля. Вібраційні гіроскопи також демонструють відмінну лінійність і стабільність, підвищуючи їх надійність і продуктивність.

Обмеження:

Вібраційні гіроскопи мають певні обмеження, які слід враховувати. Вони чутливі до вібрації навколишнього середовища та механічного шуму, що може призвести до похибок вимірювань. Крім того, виробничий процес і точне калібрування вібраційних гіроскопів можуть бути складними, що впливає на їх точність. З часом може виникнути дрейф вихідного сигналу гіроскопа, що потребує калібрування або методів компенсації.

Досягнення:

Удосконалення технологій призвело до розробки інтегрованих вібраційних гіроскопів MEMS, які забезпечують мініатюрність, економічну ефективність і покращену продуктивність. Ці гіроскопи широко використовуються в споживчій електроніці та різноманітних системах визначення руху.

Підсумовуючи, вібраційні гіроскопи забезпечують надійний і точний засіб вимірювання кутової швидкості на основі ефекту Коріоліса. Вони знайшли широке застосування в IMU, навігаційних системах і програмах керування рухом, сприяючи точному відстеженню руху, оцінці орієнтації та стабілізації в різних пристроях і системах. Постійний прогрес у технології MEMS продовжує розширювати можливості та застосування вібраційних гіроскопів.

1.2.4. Волоконно–оптичні гіроскопи (ВОГ).

Волоконно–оптичні гіроскопи (ВОГ) — це датчики кутової швидкості, які використовують ефект Саньяка для вимірювання обертальних рухів. ВОГ засновані на принципах волоконної оптики та широко використовуються в навігаційних системах, аерокосмічних програмах та інших галузях, де потрібні точні вимірювання кутової швидкості.

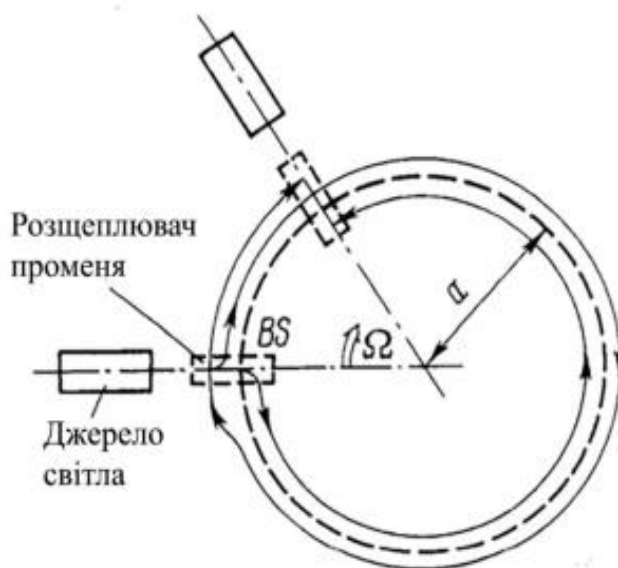


Рис. 1.5. Схема роботи ВОГ. [6]

Ось кілька ключових моментів про волоконно–оптичні гіроскопи:

Принцип роботи:

Принцип роботи ВОГ заснований на ефекті Саньяка, який стверджує, що коли світло рухається по замкнутому контуру в обертовій системі, різниця у часі, при напрямку обертання приладу та проти напрямку обертання, приходу променів (визначена інтерферометром) дозволяє знайти різницю оптичних шляхів променів в інерційній системі відліку, і, отже, величину кутового повороту приладу під час проходження променя. Величина ефекту прямо пропорційна кутовій швидкості обертання інтерферометра і площі, що охоплюється шляхом поширення світлових хвиль в інтерферометрі:

$$\Delta t = \frac{4S\Omega}{c^2} \quad (1.2)$$

де

Δt – різниця часів приходу променів, випущених в різних напрямках,

S – площа контуру,

Ω – кутова швидкість обертання гіроскопу.

Оскільки величина Δt дуже мала, то її пряме вимірювання за допомогою пасивних інтерферометрів можливе тільки в волоконно–оптичних гіроскопах з довжиною волокна 500–1000 м.

У ВОГ використовується котушка оптичного волокна, і світло розділяється та поширюється як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Обертання волоконної котушки викликає фазовий зсув світла, і, вимірявши цей фазовий зсув, можна визначити кутову швидкість.

Компоненти:

ВОГ складаються з кількох ключових компонентів. Основним компонентом є волоконна котушка, яка зазвичай намотана в конфігурацію котушки, щоб збільшити довжину взаємодії світла з обертовою рамою. Волоконна котушка зазвичай виготовляється з високочутливого оптичного волокна, такого як волокно, що підтримує поляризацію, або волокно, що обертається. ВОГ також містить джерело світла, як правило, лазерний діод, який забезпечує введення світла. Фотодетектори використовуються для вимірювання фазового зсуву світла, а електроніка обробки сигналів використовується для отримання інформації про кутову швидкість.

Типи ВОГ:

Існує два основних типи ВОГ: інтерферометричний волоконно–оптичний гіроскоп (IFOG) і резонаторний волоконно–оптичний гіроскоп (RFOG). IFOGs використовують інтерференцію світлових хвиль для вимірювання зсуву фази, тоді як RFOGs використовують властивості резонаторної структури для посилення зсуву фази. Обидва типи мають свої переваги та застосування, причому IFOG частіше використовуються в комерційних системах, а RFOG знаходять застосування в конкретних вимогах до високої продуктивності.

Переваги:

ВОГ мають ряд переваг перед іншими гіроскопічними технологіями. Вони дуже точні, забезпечуючи точні вимірювання кутової швидкості. ВОГ також стійкі до електромагнітних перешкод і можуть працювати в суворих умовах з мінімальним впливом на їх продуктивність. Вони мають широкий динамічний

діапазон, що дозволяє вимірювати як низькі, так і високі кутові швидкості. Крім того, ВОГ не мають рухомих частин, що робить їх більш міцними та менш чутливими до зносу та механічних пошкоджень.

1.2.5 Гіроскопи MEMS.

Гіроскопи MEMS, також відомі як гіроскопи мікроелектромеханічної системи, є типом датчика кутової швидкості, який використовує мікроскопічні механічні структури для вимірювання обертальних рухів. Ці гіроскопи засновані на принципах мікровиробництва та широко використовуються в споживчій електроніці, автомобільній промисловості, робототехніці та інших сферах, де потрібні невеликі розміри, низька вартість і висока продуктивність.

Ось кілька ключових моментів про MEMS–гіроскопи:

Принцип роботи:

MEMS–гіроскопи працюють за принципом ефекту Коріоліса. Коли маса обертається, вона створює силу Коріоліса, перпендикулярну як її швидкості, так і осі обертання. MEMS–гіроскопи використовують мікромасштабну структуру, як правило, вібраційну масу, яка коливається або вібрує у відповідь на застосований вхідний сигнал. Коли гіроскоп обертається, сила Коріоліса викликає відхилення або фазовий зсув у вібруючій масі. Виявивши та вимірявши це відхилення, можна визначити кутову швидкість.

Компоненти:

MEMS–гіроскопи складаються з кількох основних компонентів. Основним компонентом є вібруюча маса, яка зазвичай підвішується на гнучких балках або петлях, щоб забезпечити рух. Дослідна маса часто приводиться в дію електростатично і може коливатися в одному або кількох напрямках. Гіроскоп також містить ємнісні, п'єзоелектричні або п'єзорезистивні чутливі елементи для

виявлення відхилення, викликаного ефектом Коріоліса. Вбудована електроніка, така як підсилювачі та схеми обробки сигналів, використовується для перетворення вихідного сигналу датчика в вимірну кутову швидкість.

Типи MEMS гіроскопів:

MEMS–гіроскопи можна класифікувати на різні типи на основі їх конструкції та принципів роботи. До них належать одноосьові гіроскопи, які вимірюють кутову швидкість навколо однієї осі, двоосьові гіроскопи, які вимірюють кутову швидкість навколо двох перпендикулярних осей, і триосьові гіроскопи, які вимірюють кутову швидкість навколо трьох ортогональних осей. Крім того, деякі гіроскопи MEMS використовують різні сенсорні механізми, такі як ємнісні або п'єзореzystивні, для виявлення перевіреного відхилення маси.

Переваги:

MEMS–гіроскопи мають ряд переваг, які роблять їх популярними в різних сферах застосування. Вони компактні та легкі, що робить їх придатними для інтеграції в невеликі електронні пристрої, такі як смартфони, ігрові пристрої та переносні пристрої. MEMS–гіроскопи також є економічно ефективними у виробництві завдяки процесам серійного виготовлення, які забезпечуються методами мікрофабрикації. Вони мають низьке енергоспоживання, що забезпечує тривалий термін служби батареї в портативних пристроях. Крім того, MEMS–гіроскопи демонструють хорошу стійкість до ударів і вібрації, що робить їх надійними для використання в складних умовах.

Застосування:

Гіроскопи MEMS знайшли широке застосування в побутовій електроніці, включаючи смартфони, планшети, ігрові консолі та пристрої віртуальної реальності. Вони використовуються для визначення руху, розпізнавання жестів, стабілізації зображення та орієнтації екрана. MEMS–гіроскопи також використовуються в автомобільних додатках для електронного контролю стабільності, виявлення перекидання та навігаційних систем. Інші програми

включають робототехніку, дрони, навігаційні системи, інерціальні вимірювальні пристрої (IMU) і промислову автоматизацію.

Обмеження:

Незважаючи на те, що MEMS–гіроскопи пропонують багато переваг, вони також мають обмеження, які слід враховувати. Вони можуть демонструвати певний рівень шуму та дрейфу, що може вплинути на точність вимірювань. Такі фактори навколишнього середовища, як коливання температури та механічна вібрація, можуть впливати на роботу гіроскопів MEMS. Крім того, чутливість і динамічний діапазон MEMS–гіроскопів можуть бути нижчими порівняно з деякими іншими типами гіроскопів.

Підсумовуючи, MEMS–гіроскопи забезпечують компактні, недорогі та високоефективні рішення для вимірювання кутової швидкості. Вони широко використовуються в побутовій електроніці, автомобільній промисловості, робототехніці та інших сферах, де важливі невеликі розміри, економічна ефективність і надійність. Постійний прогрес у техніці мікрофабрикації продовжує покращувати продуктивність і застосування гіроскопів MEMS.

1.3. Сфери застосування.

Навігація та робототехніка

Датчики кутової швидкості є важливими в навігаційних системах, надаючи вхідні дані для орієнтації, курсу та відстеження положення. Вони відіграють вирішальну роль в автономних транспортних засобах, дронах, роботизованій зброї та безпілотних літальних апаратах (БПЛА) для точного контролю та планування руху.

Аерокосмічна промисловість і оборона

Гіроскопи широко використовуються в аерокосмічних програмах, включаючи навігацію літаків, наведення ракет, контроль орієнтації супутників і дослідження космосу. Вони забезпечують точні вимірювання та стабілізацію в динамічних середовищах.

Автомобільна промисловість

Датчики кутової швидкості використовуються в передових системах допомоги водієві (ADAS) для надання важливої інформації для контролю стабільності автомобіля, виявлення перекидання та допомоги в керуванні. Вони сприяють підвищенню безпеки та продуктивності сучасних автомобілів.

Віртуальна реальність та ігри

Гіроскопи інтегровані в системи віртуальної реальності (VR) та ігрові пристрої для відстеження рухів користувача та забезпечення захоплюючого досвіду. Вони забезпечують точне визначення руху та розпізнавання жестів.

Промислова автоматизація

Датчики кутової швидкості використовуються в промисловій автоматизації для моніторингу та керування обертальними рухами машин, роботів і конвеєрних систем. Вони забезпечують точне позиціонування, контроль швидкості та синхронізацію.

Висновок до Розділу 1

У Розділі 1 було розглянуто датчики кутової швидкості, які використовуються для вимірювання швидкості обертання або кутової швидкості об'єкта чи системи. З'ясовано, що ці датчики знаходять широке застосування в різних сферах, включаючи навігацію, робототехніку, аерокосмічну промисловість,

автомобільну промисловість, віртуальну реальність та ігри, промислову автоматизацію.

Детально описано різні типи датчиків кутової швидкості, такі як механічні гіроскопи, датчики з механічною пружиною, поплавкові гіроскопи, вібраційні гіроскопи, волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) та гіроскопи MEMS. Для кожного типу наведено інформацію про компоненти, принцип роботи, застосування, обмеження та досягнення.

Також наведено приклади сфер застосування датчиків кутової швидкості, підкреслюючи їх важливість у навігації, робототехніці, аерокосмічній промисловості, автомобільній промисловості, віртуальній реальності та іграх, промисловій автоматизації.

Отже, Розділ 1 надає читачу всебічний огляд датчиків кутової швидкості, їх типів, принципів роботи, застосувань і обмежень. Цей розділ є важливим вступом до подальшого дослідження і написання дипломного проєкту, і може слугувати цінним джерелом інформації для студентів і фахівців, які цікавляться даною темою.

Розділ 2.

РОЗРАХУНКОВО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Вибір конструктивної схеми.

В Розділі 2 проводяться розрахунки та розробляється конструкція датчика кутової швидкості. Основні кроки включають вибір поплавкового типу датчика через його сучасність та широкий діапазон температур. Також ми визначаємо габарити датчика, включаючи параметри, вибір гіродвигуна та опор, а також розраховуємо рухомий вузол поплавка. Крім того, розглядаємо методичні похибки, пов'язані з гіроскопічним моментом, центробіжними силами інерції та співмножником основного гіроскопічного моменту. Цей розділ допоможе нам створити ефективний та надійний ДКШ.

Спочатку потрібно визначення добротність приладу: $\frac{\omega_{\zeta \max}}{\omega_{\zeta \min}} = \frac{60}{0.1} = 600$

ДКШ поплавкового типу з повним зважуванням рухомого вузла є раціональним вибором у випадку, коли маємо великий діапазон змін температури навколишнього середовища (від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$) без доступу до термостатування. Зважаючи на значні величини, $\dot{V}_{\eta}$, $\dot{V}_{\xi}$ і $\dot{V}_{\zeta}$ та мале значення $\omega_{\zeta \min} = 0,1[1/\text{с}]$ такий тип ДКШ забезпечує більш точні і надійні вимірювання.

ДКШ поплавкового типу з повним зважуванням рухомого вузла включає у себе рухомий вузол, який повністю зважується, щоб уникнути навантаження на підшипники і мінімізувати вплив моменту тертя. Це дозволяє досягти більшої стійкості і точності роботи приладу незалежно від змін температури.

Такий тип ДКШ забезпечує компенсацію впливу температурних змін, що особливо важливо в умовах великого діапазону змін температур. Він дозволяє підтримувати сталу працездатність приладу і досягати високої точності вимірювань навіть без термостатування.

Таким чином, вибір ДКШ поплавкового типу з повним зважуванням рухомого вузла є обґрунтованим з урахуванням добротності, широкого діапазону змін температури та потреби у стійкому і точному вимірюванні кутової швидкості.

Враховуючи такий температурний діапазон, а також неприпустимість термостатування, обираємо рідину з $\gamma_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^4 (\text{Н} / \text{м}^3)$. Відповідно до рекомендацій було обрано датчик моменту магнітоелектричного типу з рухомою котушкою, з наступних причин: такий датчик використовують в ДКШ класу середньої та високої точності, при тому у ньому відсутній момент гістерезису (сила). Крім нього було взято датчик кута електромагнітного типу.

При $k_{en} \gg k_{\text{л}} + H\omega_{\eta}$ на точність ДКШ майже не впливають ні залишковий сигнал, ні нелінійність вихідної характеристики датчика кута.

2.2. Визначення габаритів датчика кутової швидкості.

2.2.1. Основні параметри ДКШ.

Об'єм $V_{\text{ДКШ}}$ та площу $S_{\text{ДКШ}}$ можна визначити маючи задану вагу приладу $G_{\text{ДКШ}} = 5\text{Н}$. Варто врахувати, у випадку сучасних «сухих» ДКШ та із рідинним заповненням питома середня вага $\gamma_{\text{ДКШ}} = (5 \div 5,5) \cdot 10^4 (\text{Н} / \text{м}^3)$, а для приладів з

повним зважуванням рухомого вузла $\gamma_{ДКШ} = 3 \cdot 10^4 (H / м^3)$ у випадку використання зважуючої рідини з питомою вагою $\gamma_{Ж} = 2 \cdot 10^4 (H / м^3)$ та $\gamma_{Ж} = 3 \cdot 10^4 (H / м^3)$ при $\gamma_{Ж} = 1 \cdot 10^4 (H / м^3)$ (При мінусових температурах тяжкі рідини $\gamma_{Ж} = 2 \cdot 10^4 (H / м^3)$ затвердівають, тому $\gamma_{Ж} = 1 \cdot 10^4 (H / м^3)$ використовують саме при мінусових температурах).

$$\gamma_{ДКШ} = 3 \cdot 10^4 (H / м^3).$$

$$V_{ДКШ} = \frac{G_{ДКШ}}{\gamma_{ДКШ}} = \frac{5}{3 \cdot 10^4} = 1,67 \cdot 10^{-4} (м^3) = 167 (см^3) \quad (2.1)$$

Рационально спроектований датчик кутової швидкості із електричною пружиною виглядає як циліндр, діаметр $D_{ДКШ}$ близько в 2,5 менша за його довжину $L_{ДКШ}$.

Тому:

$$D_{ДКШ} = \sqrt[3]{\frac{4V_{ДКШ}}{2,5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot \pi}} = 0,044 (м) \approx 4,4 (см) \quad (2.2)$$

$$L_{ДКШ} = 2,5 \cdot D_{ДКШ} = 11 (см); \quad (2.3)$$

Площа поверхні ДКШ $S_{ДКШ}$:

$$S_{ДКШ} = 3 \cdot \pi \cdot D_{ДКШ}^2 = 3 \cdot 3,14 \cdot 0,044^2 = 0,0182 (м^2) = 182 (см^2). \quad (2.4)$$

Для термостатованого приладу $t_{p\max} = t_{термостата}$ (зазвичай $70-75^\circ C$). У випадку нетермостатованих приладів $t_{p\max} = 80 \div 90^\circ C$

P – припустима потужність, яка може виділятися елементами ДКШ:

$$P_{ДКШ} = \alpha k_1 S_{ДКШ} (t_{p\max} - t_{c\max}), \quad (2.5)$$

де $\alpha = 7 \div 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ (для повітря при нормальному тиску; конвекція вільна);

$k_1 = 1,2 \div 1,5$ – коефіцієнт, що враховує теплопередачу через елементи кріплення ДКШ до об'єкта

$$P_{\text{ДКШ}} = 1,2 \cdot 7 \cdot 18,2 \cdot 10^{-3} \cdot (90^\circ - 60^\circ) = 4,586 (\text{Вт})$$

2.2.2. Вибір гіродвигуна.

Далі необхідно розподілити потужність між датчиком моменту та гіродвигуном приладу. Також потрібно врахувати, щоб потужність, яка виділяється іншими елементами ДКШ, такими як датчик кута і віброопори, не перевищувала 10% загальної потужності. З урахуванням цієї вимоги, ми обираємо гіродвигун симетричної конструкції зі стальним ротором і частотою обертання 24000 об/хв. Для ефективного розподілу отриманої потужності між гіродвигуном $P_{\text{ГМ}}$ та датчиком моменту $P_{\text{ДМ}}$, складемо таблицю 1.

Таблиця 1

Розподіл потужності між гіродвигуном та датчиком моменту

H ($\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$)	$P_{\text{ГМ}}$ (Вт)	$G_{\text{ГМ}}$ (Н)	$0,8M_{\text{max}}$ ($\text{Н} \cdot \text{см}$)	$P_{\text{ДМ}}$ (Вт)	$G_{\text{ДМ}}$ (Н)	$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}}$ (Н)	$V_{\text{пу}}$ (м^3)
2,5	2,2	0,75	1,754	1,93	3,7	4,95 Не проходить	-
1,5	2,05	0,55	1,05	2,08	2,1	2,65 Не проходить	-

1,0	1,95	0,45	0,7	2,18	1,2	1,65 He проходить	$0,91 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ He проходить
0,5	1,85	0,4	0,35	2,28	0,6	1,0 проходить	$0,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ проходить

де $G_{ГМ}, G_{ДМ}$ – вага датчика моменту та гіродвигуна; $P_{ГМ}, P_{ДМ}$ – потужність датчика кута та гіродвигуна; $V_{ПВ}$ – об'єм рухомого вузла ДКШ.

У розгляді різних гіродвигунів з різними значеннями кінетичного моменту ми зможемо вибрати той, що найкраще відповідає нашим потребам.

- Маючи гіродвигун з кінетичним моментом $H = 2,5 (H \cdot \text{см} \cdot \text{с})$:
 $M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 2,5 \cdot 1,22 = 2,443 (H \cdot \text{см})$

Для визначення потужності датчика моменту $P_{ДМ}$ ми можемо скористатись наступним математичним виразом, який дозволяє розрахувати це значення.

$$P_{ДМ} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 2,2 = 0,0293 (\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проєктованого датчика кутової швидкості

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(H).$$

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} = 3,75 + 0,75 = 4,45(H).$$

Даний гіродвигун не задовольняє умовам.

- Маючи гіродвигун з кінетичним моментом $H = 1,5 (H \cdot \text{см} \cdot \text{с})$:

$$M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 1,22 = 1,464 (H \cdot \text{см})$$

Для визначення потужності датчика моменту $P_{ДМ}$ ми можемо скористатись наступним математичним виразом, який дозволяє розрахувати це значення.

$$P_{ДМ} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 2,05 = 0,1793 (\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проєктованого датчика кутової швидкості

$$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}} \leq 0,5G_{\text{ДКШ}} \leq 2(H).$$

$$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}} = 2,1 + 0,75 = 2,65(H).$$

Даний гіродвигун не задовольняє умовам.

- Маючи гіродвигун з кінетичним моментом $H = 1,0(H \cdot \text{см} \cdot \text{с})$:

$$M = 0,8 \cdot M_{\text{max}} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \text{max}} = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,22 = 0,976(H \cdot \text{см})$$

Для визначення потужності датчика моменту $P_{\text{ДМ}}$ ми можемо скористатись наступним математичним виразом, який дозволяє розрахувати це значення.

$$P_{\text{ДМ}} = 0,9P_{\text{ДКШ}} - P_{\text{ГМ}} = 0,9 \cdot 2,477 - 1,95 = 0,2793(\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проєктованого датчика кутової швидкості

$$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}} \leq 0,5G_{\text{ДКШ}} \leq 2(H).$$

$$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}} = 1,2 + 0,45 = 1,65(H).$$

Цей конкретний гіродвигун відповідає вимогам і задовольняє потреби нашого проєкту, враховуючи встановлені умови $G_{\text{ДМ}} + G_{\text{ГМ}} \leq 0,5G_{\text{ДКШ}} \leq 2(H)$.

- Маючи гіродвигун з кінетичним моментом $H = 0,5(H \cdot \text{см} \cdot \text{с})$:

$$M = 0,8 \cdot M_{\text{max}} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \text{max}} = 0,8 \cdot 0,5 \cdot 1,22 = 0,488(H \cdot \text{см})$$

Для визначення потужності датчика моменту $P_{\text{ДМ}}$ ми можемо скористатись наступним математичним виразом, який дозволяє розрахувати це значення.

$$P_{\text{ДМ}} = 0,9P_{\text{ДКШ}} - P_{\text{ГМ}} = 0,9 \cdot 2,477 - 1,85 = 0,3793(\text{Вт})$$

При проєктуванні датчика кутової швидкості важливо враховувати, щоб сумарна вага датчика моменту і гіромотору не перевищувала половину ваги самого датчика кутової швидкості. Це дозволить забезпечити раціональну вагову балансування системи та забезпечити її надійну роботу.

$$G_{DM} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(H).$$

$$G_{DM} + G_{ГМ} = 0,6 + 0,4 = 1,0(H).$$

Цей конкретний гіродвигун відповідає вимогам і задовольняє потреби нашого проекту, враховуючи встановлені умови $G_{DM} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(H)$.

2.2.3. Обчислення поплавка рухомого вузла.

Для пристроїв, які використовують датчики моменту з рухомою котушкою, маса рухомого вузла:

$$G_{ПУ} = 1,1 \cdot (G_{ГМ} + G_{DM}).$$

$$G = 1,1 \cdot (0,4 + 0,6) = 1,1(H)$$
(2.6)

тоді об'єм рухомого вузла

$$V_{ПУ} = G_{ПУ} / \gamma_{ж}$$

$$V_{ПУ} = 1,1 / (2 \cdot 10^4) = 0,55 \cdot 10^{-4} (м^3) = 55 (см^3).$$
(2.7)

Об'єм рухомого вузла $V_{ПУ}$ обмежений на рівні 45 – 50% $V_{ДКШ}$ від отриманого значення за попередньою формулою при $\gamma_{ж} \approx 1 \cdot 10^4 (Н / м)$.

$$0,5V_{ДКШ} = 0,5 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4} = 0,665 \cdot 10^{-4} (м^3)$$

$$0,55 \cdot 10^{-4} < 0,665 \cdot 10^{-4} \text{ – умова виконується.}$$

Враховуючи задані розміри та умови експлуатації, буде знайдено оптимальне значення кінетичного моменту гіродвигуна $H = 0,5 (Н \cdot см \cdot с)$

Діаметр поплавка:

$$D_{ПУ} = 0,8D_{ДКШ}$$
(2.8)

$$D_{ПУ} = 0,8 \cdot 4,4 = 3,52(см)$$

Довжина поплавка:

$$L_{ПУ} = V_{ПУ} \cdot 4 / (\pi \cdot D_{ПУ}^2) \quad (2.9)$$

$$L_{ПУ} = 55 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3,52^2) = 5,7(см)$$

2.2.4. Розрахунок датчика моменту.

Обчислимо об'єм датчика $V_{ДМ}$ моменту за відповідною формулою:

$$V_{ДМ} = \frac{G_{ДМ}}{\gamma_{ДМ}} \quad (2.10)$$

$$V_{ДМ} = \frac{0,6}{6,25 \cdot 10^4} = 0,096 \cdot 10^{-4} = 9,6(см^3)$$

де $\gamma_{ДМ} = 6,25 \cdot 10^4 \left(\frac{Н}{м^3}\right)$ – середня питома вага датчика моменту.

Діаметр датчика моменту $D_{ДМ}$:

$$D_{ДМ} = 0,8 D_{ДКШ} \quad (2.11)$$

$$D_{ДМ} = 0,8 \cdot 4,4 = 3,52(см)$$

Довжина датчику моменту $L_{ДМ}$:

$$L_{ДМ} = V_{ДМ} \cdot 4 / (\pi \cdot D_{ПУ}^2)$$

$$L_{ДМ} = 9,6 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3,52^2) = 0,99(см)$$

2.2.5. Вибір опор.

На рухомий вузол можуть діяти шкідливі моменти. Знайдемо їх допустимий рівень зважаючи на отримані значення кінетичного моменту.

$$M_{\text{вр}} \leq \omega_{\zeta} \cdot H = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0,1}{180} = 8,726 \cdot 10^{-4} (H \cdot \text{см}) \quad (2.13)$$

Існують такі шкідливі моменти для датчиків кутової швидкості:

$M_{\text{тр}}$ – момент тертя. Визначається передбачуваним типом опор рухомого вузла.

$M_{\text{розб}}$ – можна визначити зсувом центру мас і центру тиску рухомого вузла.

Називається моментом розбалансованості.

$M_{\text{тяж}}$ – момент тяжіння, який діє при узгодженому положенні датчика кута на рухомий вузол.

При попередньому проектуванні отримаємо результат, який враховує відповідні етапи проектування.:

$$\omega_{\zeta \min} = \frac{\omega_{\zeta \min}}{1800} = 0,0000556 \text{ град/с}$$

$$M_{\text{вр}} = \sqrt{M_{\text{тр}}^2 + 2M_{\text{тр.рег}}^2} + \Delta M_{\text{вр}}; \quad (2.14)$$

$$M_{\text{тр}} = M^* + K_{\text{тр.пад}} + K_{\text{тр.ос}}$$

де $M_{\text{тр}}, M_{\text{тр.рег}}, M^*$ ($M^* = 0$, тому що в нашому випадку проектується поплавковий ДКШ) – моменти тертя, які впливають на рухомий вузол під час експлуатації, регулювання та ті які залежать від регулювання та навантажень ДКШ.

Відношення залишкової ваги рухомого вузла до прискорення сили тяжіння називають залишковою масою. Обчислимо її:

$$m_{\text{зал.}} = \beta_{\text{р.}} \cdot \left(\frac{t_{\text{сmax}} - t_{\text{сmin}}}{2} \right) \cdot \frac{G_{\text{ПУ}}}{g} \quad (2.15)$$

$$m_{зал.} = \frac{0,1}{100} \cdot \frac{50^\circ + 50^\circ}{2} \cdot \frac{1,1}{9,8} = 0,0056(kг)$$

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

Обчислення реакції опор:

R_1 – осьова складова реакції опор.

$$R_1 = m_{зал.} \cdot V_\zeta \quad (2.16)$$

$$R_1 = 0,0056 \cdot 4 \cdot g = 0,07033(H)$$

R_2 – радіальна складова реакції опор.

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \quad (2.17)$$

$$R_2 = |m_{зал.} \cdot V_\zeta = 0,0056 \cdot 4 \cdot g = 0,07033(H)|$$

$$R_2 = \left| \frac{2 \cdot H \cdot \omega_\zeta}{L} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 90 \cdot \pi}{16 \cdot 180} = 0,0981(H) \right|$$

2.2.6. Конструктивна схема приладу.

Гіроmotor виступає як основний компонент датчика кутової швидкості, який надійно закріплений в корпусі гіроскопа. Він розташований таким чином, щоб вісь обертання ротора гіромотора була перпендикулярна поздовжній осі гіроскопа. Каркас гіроскопа утримує ротор датчика кута трансформатора разом із каркасом, що містить котушки, які є невід'ємною частиною датчика крутного моменту, також відомого як електрична пружина.

У приладі, про який йдеться, вихідний сигнал, що представляє собою постійну напругу, зчитується з навантаження, який послідовно з'єднується з обмоткою датчика моменту. При цьому навантаження складається з опору R_m навантаження підсилювача, який розташований всередині підсилювача, а також

додаткового резистора R_0 , який встановлений у датчику кутової швидкості і використовується для налаштування тарировочної характеристики.

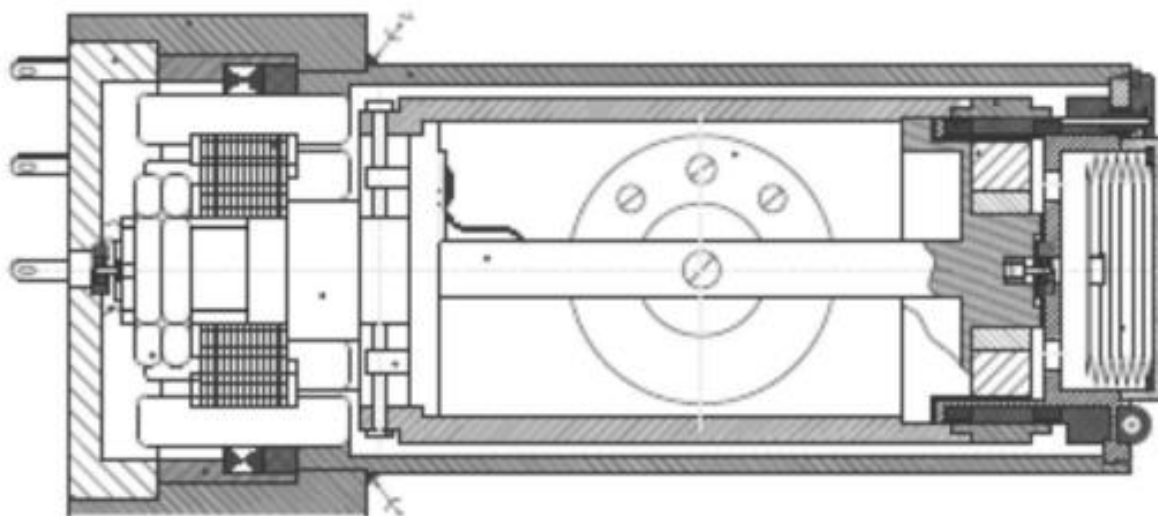


Рис. 2.1. Конструктивна схема ДКШ

Для зменшення навантаження на підшипники та моменту тертя в опорах, в датчику кутової швидкості використовується рідина, яка заповнює внутрішню частину корпусу. Гіровузол розташовується на підшипниках всередині корпусу. Магніт датчика моменту кріпиться до корпусу за допомогою гайки, а вузол датчика кута вставляється з іншого боку корпусу і закріплюється гвинтами. На вузол датчика кута кріпиться панель з канавками, в які вкладають гнучкі токопідводи. Одна сторона токопідводів з'єднується з контактною колодою кришки через контакти на датчику кута, а інша сторона з'єднується з контактами на гіровузлі. Шайба кріпиться гвинтами до панелі, щоб захистити токопідводи від механічних пошкоджень. Корпус приладу закривається кришкою з одного боку і сильфоном з іншого боку, а потім герметизується пропаянням по всьому діаметру. Вузол сильфону використовується для компенсації температурного розширення рідини, яка заповнює внутрішню частину датчика.

Гіровузолу датчика кутової швидкості має форму рамки, в якій розміщений гіродвигун. Вісь гіродвигуна фіксується за допомогою спеціальних накладок і гвинта. Зовнішня частина рамки покрита тонкостінним стаканом. У внутрішній

частині гіровузла заповнено воднем. Для подачі електроживлення до гіродвигуна на одному з торців рамки розташовані три гермовводи. Також на тій же стороні гіровузла є чотири балансувальних гвинта, які використовуються для балансування гіровузла навколо його підвісу. На рамці гіровузла закріплений ротор датчика кута, а ззаду встановлений каркас з котушками датчика моменту.

Датчик кута трансформаторного типу з рухомим якорем є багатополюсним пристроєм, розроблений для перетворення рухів гіровузла на вимірювальний електричний сигнал. Конструктивно датчик кута (див. рис.2.2) складається зі статора, включаючи обмотки збудження та сигнальну, загальна конструкція включає основи, на яких розташований статор і пакет ротора з видимими полюсами і контактами для підключення проводів. Робота датчика кута ґрунтується на зміні розподілу магнітних потоків, які перетинають сигнальну обмотку, через зміну магнітного опору при зсуві зубців ротора відносно пазів статора.

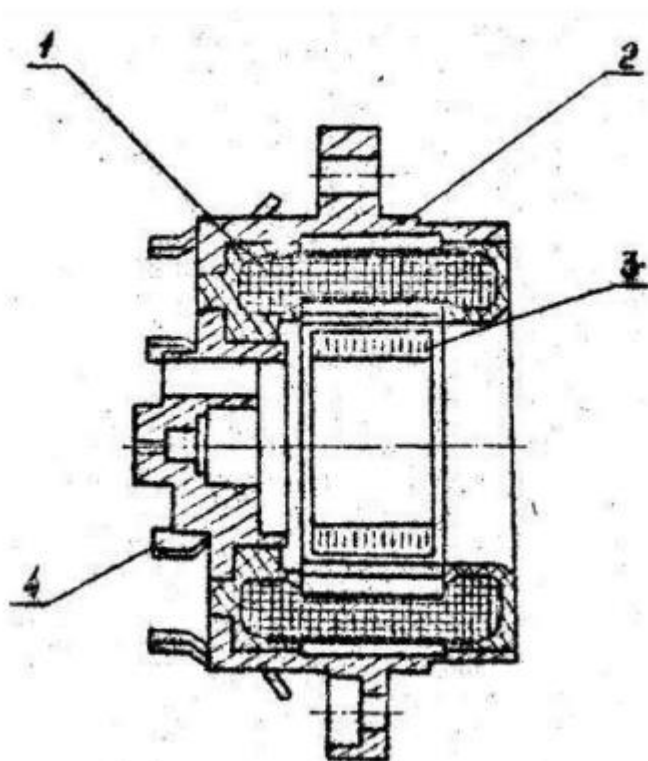


Рис. 2.2. Електричний датчик кута: 1 – статор з обмотками; 2 – основа; 3 – ротор; 4 – контакт.

Функціональність датчика моменту полягає у створенні протидіючого моменту, який компенсує гіроскопічний момент. Магнітоелектричний датчик (див. рис.2.3) складається з постійного шестиполюсного магніта, який закріплений на корпусі, каркасу з шістьма котушками, який закріплений на гіровузлі, а також екрана, що виступає в якості корпусу пристрою. Він містить п'ять котушок електричної пружини та одну котушку для дистанційного контролю.

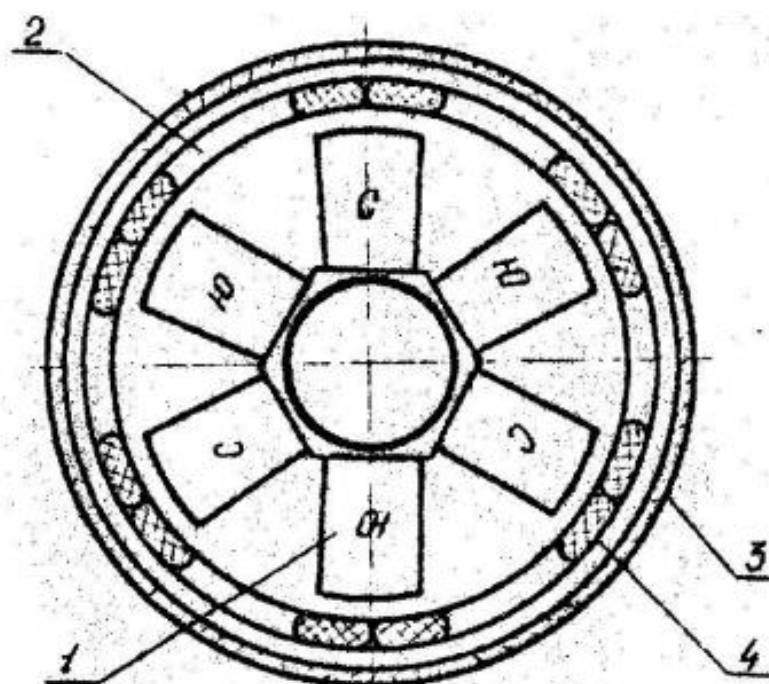


Рис. 2.3. Датчик моменту: 1 – магніт шестиполюсний; 2 – каркас котушок; 3 – екран магнітний (корпус приладу); 4 – котушки

2.2.7. Визначення температури перегріву.

Для нетермостабільних приладів, температуру нульової плавучості $t_{н.п.}$, можна обчислити за наступною формулою:

$$t_{н.п.} = 0,5 \cdot (t_{с\max} + t_{с\min}) + t_{перегр} \quad (2.19)$$

$$\text{де } t_{\text{перегр}} = \frac{(P_{\text{ДМ}} + P_{\text{ГМ}} + P_{\text{ДК}} + P_0)}{k_1 S_{\text{ДКШ}} \cdot a} = \frac{(2,28 + 1,85 + 0,1(2,28 + 1,85))}{0,0713 \cdot 1,2 \cdot 7} = 7,5(^{\circ}\text{C})$$

За допомогою таблиці 1 ми вибрали гіродвигун, тому за допомогою температури перегріву $t_{\text{перегр}} = t_{p\text{max}} - t_{c\text{min}}$ ми перевіряємо правильність розрахунків. Можемо визначити максимальне та мінімальне значення температури корпусу:

$$t_{p\text{max}} = t_{c\text{max}} + t_{\text{перегр}} = 50^{\circ} + 7,5^{\circ} = 57,5(^{\circ}\text{C})$$

$$t_{p\text{min}} = t_{c\text{min}} + t_{\text{перегр}} = -50^{\circ} + 7,5^{\circ} = -42,5(^{\circ}\text{C})$$

Тобто для рухомого вузла температура нульової плавучості буде:

$$t_{\text{н.п.}} = 0,5 \cdot (t_{c\text{max}} + t_{c\text{min}}) + t_{\text{перегр}} = 0,5 \cdot (50^{\circ} - 50^{\circ}) + 7,5^{\circ} = 7,5(^{\circ}\text{C})$$

Перевіримо правильність розрахунків:

$$t_{\text{перегр}} = t_{p\text{max}} - t_{c\text{min}} = 57,5^{\circ} - 50^{\circ} = 7,5(^{\circ}\text{C})$$

Що означає, що наші розрахунки вірні.

2.3. Розрахунок методичних похибок.

2.3.1. Похибка від впливу гіроскопічного моменту $H_{\omega_{\xi}} \sin \beta$ від перехресної кутової швидкості.

$$\begin{aligned} J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + c\beta &= H_{\omega_{\xi}} \cos \beta - H_{\omega_{\xi}} \sin \beta - J_y \dot{\omega}_{\eta} + \\ &+ (J_z - J_x)(\omega_{\xi} \cos \beta - \omega_{\xi} \sin \beta) \times (\omega_{\xi} \cos \beta + \omega_{\xi} \sin \beta) - \\ &- M_T \text{sign} \dot{\beta} - m(p_z \omega_x - p_x \omega_z). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Враховуючи розглянуту похибку і не зважаючи на інші похибок, можна отримати (2.20) математичну модель реакції приладу на вхідну величину ω_ζ у вигляді:

$$c\beta = H_{\omega_\xi} - H_{\omega_\zeta} \sin \beta \quad (2.21)$$

Лінеаризувавши $\sin \beta$ із (2.21) отримаємо:

$$\beta = \frac{H_{\omega_\zeta}}{c + H_{\omega_\zeta}} \quad (2.22)$$

Відношення $H_{\omega_\zeta} \ll c$ можна вважати справедливим оскільки ω_ξ та ω_ζ мають майже однакові значення, а $H_{\omega_\xi} \ll c$ необхідне для забезпечення невеликих відхилень по куту β зберігається. Тепер перепишемо (2.22), користуючись при цьому приближеною залежністю $\frac{1}{1 \pm \varepsilon} \cong 1 \mp \varepsilon$ ($\varepsilon \ll 1$), щоб отримати більш простий вигляд:

$$\beta = \frac{H_{\omega_\xi}}{c} \left(1 - \frac{H_{\omega_\zeta}}{c}\right) \quad (2.23)$$

Враховуючи вплив заваду яку розглядали, із рівняння (2.23) можна розрахувати значення $\beta = \frac{H_{\omega_\xi}}{c}$ не враховуючи цієї перешкоди. Тоді отримаємо наступну формулу абсолютної похибки від адаптивної перешкоди – $H_{\omega_\zeta} \sin \beta$, яку запишемо в розмірності вихідної величини β :

$$\delta_{\omega_\zeta}^\beta = -\frac{H^2}{c^2} \omega_\xi \omega_\zeta \quad (2.24)$$

Верхній індекс вказує що похибка виражена в розмірності вихідної величини приладу – кута β , а ось нижній на причину цієї похибки.

В такому випадку, формула (2.24) матиме вигляд:

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta} = \frac{-H^2}{c^2} \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \quad (2.25)$$

де $\omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max}$ – максимальні значення $\omega_{\xi} \omega_{\zeta}$.

Без урахування перешкод максимальне значення величини приладу можна визначити наступною рівністю:

$$\beta_{\max} = \frac{H}{c} \omega_{\xi \max} = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot 3,14}{61,05 \cdot 180} = 0,014 (\text{рад}) \quad (2.26)$$

$$c = \frac{H \omega_{\eta \max}}{\left[\delta_{\omega \eta} \right]_{a \ddot{i} i}} = \frac{0,5 \cdot 0,7 \cdot 100 \cdot 3,14 / 180}{0,01} = 61,05 (H \cdot i)$$

формулу (2.26) можна представити у вигляді:

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta} = -\frac{H}{c} \omega_{\xi \max} \beta_{\max} = -\frac{\omega_{\zeta \max}}{\omega_{\xi \max}} \beta_{\max}^2 \quad (2.27)$$

В розмірності розглянутої величини ω_{ξ} можна отримати формулу розглянутої похибки. Для цього потрібно привести похибку $\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta}$ до входу приладу, фактично поділивши $\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta}$ на статичний коефіцієнт передачі $K = \frac{H}{c}$. Це дасть нам наступне:

враховуючи (2.27):

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta}}{K} = \frac{-H}{c} \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \quad (2.28)$$

чи враховуючи (2.28):

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\omega_{\xi}} = -\omega_{\xi \max} \beta_{\max} \quad (2.29)$$

Якщо формулу абсолютної похибки в розмірності ω_{ξ} поділимо на $\omega_{\xi \max}$ або формулу абсолютної похибки в розмірності β поділимо на $\beta_{\max}$, то отримаємо формулу максимального значення приведеної формули.

Враховуючи (2.28) або (2.29) та використавши (2.27), можемо знайти:

$$\delta_{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta}}{\beta_{\max}} = \frac{\delta_{\omega_{\xi}}^{\omega_{\xi}}}{\omega_{\xi \max}} = -\frac{H}{c} \omega_{\xi \max} = -\frac{\omega_{\xi \max}}{\omega_{\xi \max}} \beta_{\max} = -\frac{100}{7,74} \cdot 0,014 = 0,8\% \quad (2.30)$$

Всі дані можна отримати простішим способом. Наприклад якщо $\beta_{\max}$ (максимальне значення кута повороту рухомої частини приладу) розглянути як параметр, то можна оцінити максимальний вплив моменту-перешкоди $H\omega_{\xi} \sin \beta_{\max} \cong H\omega_{\xi} \beta_{\max}$. Для цього використавши рівність:

$$c\beta = -H\omega_{\xi \max} \beta_{\max}.$$

Саме звідси і отримуємо, у формі (2.29) від впливу ω_{ξ} , формулу абсолютної похибки. Вирішивши (2.21) методом послідовних наближень, можна отримати такий самий результат. Також куди простіше можна отримати формулу максимального значення відносної приведенної похибки (2.30). Для цього всього лиш необхідно записати наступне відношення:

$$\frac{H\omega_{\xi \max} \beta_{\max}}{H\omega_{\xi \max}}$$

де $H\omega_{\xi \max} \beta_{\max}$ – максимальне значення розглянутого моменту-перешкоди,

$H\omega_{\xi \max}$ – максимальне значення корисного моменту (без урахування співмножника $\cos \beta$, а точніше його впливу).

Зменшення кутів $\beta_{\max}$ граничного відхилення рухомої частини приладу від положення рівноваги є найбільш радикальним способом зменшення похибки датчика кутової швидкості від перехресної кутової швидкості ω_{ξ} . Схеми компенсаційних ДКШ дають більше можливостей в обмеженні кутів β .

2.3.2. Похибка від моменту центробіжних сил інерції.

$$(J_z - J_x)(\omega_\xi \cos \beta - \omega_\zeta \sin \beta)(\omega_\xi \sin \beta - \omega_\zeta \cos \beta)$$

Цю формулу можна перетворити до вигляду:

$$(J_z - J_x) \left[\frac{1}{2}(\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) \sin 2\beta + \omega_\xi \omega_\zeta \cos 2\beta \right] \quad (2.31)$$

Лінеаризувавши тригонометричні функції розглянутий момент-перешкода приймає вигляд:

$$(J_z - J_x) \left[(\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) \beta + \omega_\xi \omega_\zeta \right]$$

$$\text{Зі статичної рівності } c\beta = (J_z - J_x) \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right]$$

маємо формулу максимальної абсолютної похибки

$$\delta_{\ddot{o}}^\beta = \frac{J_z - J_x}{H} \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.32)$$

Формула аналогічної похибки в розмірності вимірюваної величини ω_ζ

$$\delta_{\ddot{o}}^{\omega_\zeta} = \frac{J_z - J_x}{H} \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.33)$$

Наступну формулу, а саме формулу максимального значення приведеної відносної похибки можемо отримати за допомогою такого ж методу, що й для інших методів-перешкод:

$$\delta_{\ddot{o}} = \frac{J_z - J_x}{H} \left[\omega_{\xi \max} - \frac{\omega_{\zeta \max}^2}{\omega_{\xi \max}^2} \beta_{\max} + \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.34)$$

Порівняно з похибками від інших моментів-перешкод похибка від впливу розглянутого моменту-перешкоди мала при ω_ξ та ω_ζ (малих кутових швидкостях) об'єкта похибки. Виконання умови $J_z - J_x = 0$ є очевидним зменшенням цієї перешкоди.

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

Якщо порівняти значення кута β , відповідно статичній рівності $c\beta = H\omega_{\xi \max} \beta_{\max}$, в якій враховується вплив співмножника $\cos \beta$ і значення кута β , відповідно до рівності

$$c\beta = H\omega_{\xi \max}.$$

В якій вплив співмножника не враховується, отримаємо формулу максимальної абсолютної похибки від розглянутої мультиплікаційної перешкоди.

Це порівняння дає наступне:

$$\delta_{\cos \beta}^{\beta} = \frac{H}{c} (\cos \beta_{\max} - 1) \omega_{\xi \max} \quad (2.35)$$

Розклавши $\cos \beta$ в ряд Маклорена з утриманням двох членів ряду:

$$\delta_{\cos \beta}^{\beta} = \frac{H}{2c} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^3}{2c^3} \omega_{\xi \max}^3 \quad (2.36)$$

В розмірності величини ω_{ξ} , формула аналогічної похибки має наступний

вигляд:

$$\delta_{\cos \beta}^{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\cos \beta}^{\beta}}{K} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^2}{2c^2} \omega_{\xi \max}^3 \quad (2.37)$$

А ось формула максимального значення приведенного відносно похибки має наступний вигляд:

$$\delta_{\cos \beta} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 = -\frac{H^2}{2c^2} \omega_{\xi \max}^3 = -\frac{0,5^2 \cdot 100^2 \cdot 3,14}{2 \cdot 61,05^2 \cdot 180} = 0,0059 (rad) \quad (2.38)$$

Обмеживши $\beta_{\max}$ зможемо зменшити вплив співмножника $\cos \beta$.

Вплив $\cos \beta$ проявляється в порушенні лінійної залежності $\beta = f(\omega_\xi)$. Не лінійністю електричного датчика кута, який перетворює кут β в електричний сигнал можна компенсувати не лінійність статичної характеристики датчика кутової швидкості. Це можливо за умови що датчик кута має таку ж статичну характеристику:

$$U_{вих} = \frac{k}{\cos \beta} \beta. \quad (2.39)$$

Вибором визначеного співвідношення між опором навантаження та внутрішнім співвідношенням датчика кута можна легко досягти бажаний вигляд статичної характеристики датчика кута поворотного трансформатора чи цеонометричного датчика, при умові що $\beta_{\max} \leq 5...7^\circ$.

Висновок по Розділу 2

У цьому розділі було проведено розрахунково-конструкторський аналіз для розробки датчика кутової швидкості. Ми обрали датчик кутової швидкості поплавкового типу, оскільки він відповідає нашим вимогам, зокрема щодо великого діапазону зміни температур. В процесі розрахунків визначили габарити датчика, параметри його компонентів, вибрали гіродвигун та опори. Також було виконано розрахунки методичних похибок, пов'язаних з гіроскопічним моментом, центробіжними силами інерції та іншими факторами. Отримані результати і розрахунки є важливими для подальшої розробки та побудови ангулярного швидкісного датчика.

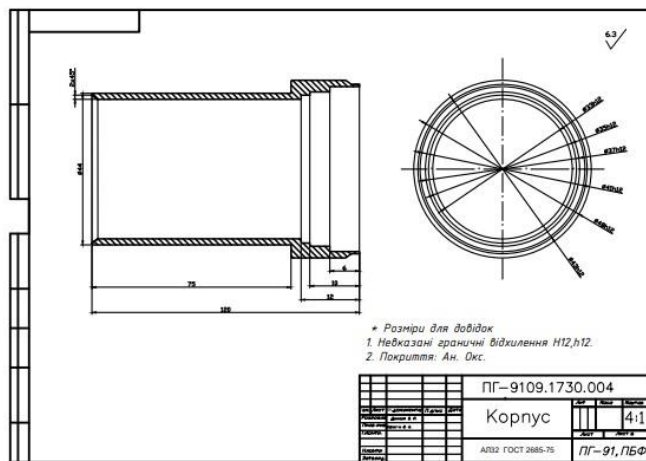
ВИСНОВОК

Під час роботи над дипломним проектом було досліджено кілька схем для створення вимірювачів кутової швидкості. Для вирішення поставленої задачі, а саме - розрахунку та проектування датчика кутової швидкості з заданими параметрами (маса датчика, максимальна та мінімальна вимірювана кутова швидкість, максимальна допустима похибка), була обрана схема ДКШ з електричною пружиною.

У проекті наведено обґрунтування вибору цієї конструктивної схеми, а також розглянуті її переваги. Описано розроблену конструкцію, проведений розрахунок та вибір необхідних конструктивних параметрів чутливого елемента. Також проведений аналіз інструментальних та динамічних похибок, розглянуті причини виникнення основних значимих похибок та запропоновані методи для їх усунення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ФІЗИКА ДЛЯ БАКАЛАВРІВ. МЕХАНІКА: 3. Гіроскопи. *physics.zfftt.kpi.ua*. URL: <http://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=272&chapterid=763> (дата звернення: 20.05.2023).
2. Одинцов А. А. Теория и расчет гироскопических приборов. – К.: Выш. шк. Главное издательство, 1985. – 392с.
3. Двухступеневі гіроскопи. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/8843989/page:2/> (дата звернення: 25.05.2023).
4. gyroscope - definition of gyroscope in English from the Oxford dictionary. *Wayback Machine*. URL: <https://web.archive.org/web/20150505003851/http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/gyroscope> (дата звернення: 04.06.2023).
5. Одинцов А. А. Компенсационные гиротаксометры. – К.: КПИ, 1969. – 118с.
6. Учасники проєктів Вікімедіа. Волоконно-оптичний гіроскоп – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптичний_гіроскоп (дата звернення: 11.06.2023).
7. Бондар П.М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи (конспект лекцій)
8. Лазарев Ю.Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч. Ю. Ф. Лазарев, П. М. Бондар – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 644с.
9. Учасники проєктів Вікімедіа. Гіроскоп – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Гіроскоп> (дата звернення: 20.05.2023).



Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				<u>Документація</u>		
A1			ПГ9109.1730.000 СК	Складальне креслення		
				<u>Деталі</u>		
		1	ПГ9109.1730.000 СК	Заглушка		
		2	ПГ9109.1730.000 СК	Підшипник		
		3	ПГ9109.1730.000 СК	Фланець		
		4	ПГ9109.1730.000 СК	Поплавець		
		5	ПГ9109.1730.000 СК	Гіромотор		
		6	ПГ9109.1730.000 СК	Поплавок		
		7	ПГ9109.1730.000 СК	Ротор		
		8	ПГ9109.1730.000 СК	Демпфер		
		9	ПГ9109.1730.000 СК	Вузол катушок		
		10	ПГ9109.1730.000 СК	Втулка		
		11	ПГ9109.1730.000 СК	Вал		
		12	ПГ9109.1730.000 СК	Штифт		
		13	ПГ9109.1730.000 СК	Корпус		
		14	ПГ9109.1730.000 СК	Кришка		
		15	ПГ9109.1730.000 СК	Гвинт М4-6d x 12.32.05		
Зм	Лист	Недокументу	Підп.	Дата	ПГ9109.1730.000 СК	
Розроб.	Демчук				Компенсаційний гіротахометр	Літ.
Перев.	Салегін					Лист
						Листів
Н.контр						
Затв.						