

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

**Приладобудівний факультет  
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані  
системи та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»**

**на тему: «Двовісний гіростабілізатор непрямої дії»**

Виконав:

Студент VI курсу, групи ПГ-з11мп  
Тищенко Богдан Юрійович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

Доцент каф. КІОНС, к.т.н.,  
Мураховський Сергій Анатолійович \_\_\_\_\_

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Професор кафедри ЕК, д.е.н., доц,  
Шевчук Олена Анатоліївна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри ВП, д.т.н., проф.  
Антонюк Віктор Степанович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма - Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студента**

Тищенко Богдана Юрійовича

1. Тема дисертації «Двовісний гіростабілізатор непрямої дії», науковий керівник дисертації Мураховський Сергій Анатолійович, к.т.н. затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації «15» травня 2023 р.

3. Об'єкт дослідження процес керування платформою по двох осях.

4. Предмет дослідження двовісний гіростабілізатор

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Вступ. 1. Огляд систем гіроскопічних систем стабілізації. 2. Вибір та обґрунтування конструктивної схеми. Розробка кінематичної схеми. 3. Розробка математичної моделі двовісної системи гіроскопічної стабілізації 4. Розробка програмної моделі системи, моделювання та аналіз результатів. Висновки

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу  
презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій 1 матеріали науково-технічних конференцій у наукових

збірниках

---

8. Консультанти розділів дисертації\*

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

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд систем гіроскопічних систем стабілізації непрямої дії.	01.03.2023	
2	Вибір та обґрунтування конструктивної схеми. Розробка кінематичної схеми.	01.04.2023	
3	Розробка математичної моделі двовісної системи гіроскопічної стабілізації	15.04.2023	
4	Розробка програмної моделі системи, моделювання та аналіз результатів	15.05.2023	
5			
6			
7			

Студент

Богдан ТИЩЕНКО

Науковий керівник дисертації

Сергій МУРАХОВСЬКИЙ

---

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## РЕФЕРАТ

В роботі за напрямком дослідження «Двовісний гіростабілізатор непрямої дії» розглянуто конструктивні типи гіростабілізаторів, елемента база, закони керування та види досліджуваних систем гіроскопічної стабілізації.

Обрана математична модель гіростабілізатора включає модель стабілізованої платформи з гіроскопами, які використовуються для визначення кутової швидкості відхилення платформи від положення рівноваги. Після проведення аналізу і корегування моделі відповідно до завдання було побудовано програмну модель в середовищі Matlab. Модель складається з підпрограми правих частин рівнянь динаміки та основної програми в якій виводяться графіки кутових швидкостей та кутів, які характеризують динамічні властивості гіростабілізатора.

Далі за допомогою Simulink розраховано контур стабілізації гіроплатформи навколо зовнішньої осі, та використовуючи вбудовані засоби, зокрема пакет Linear Analysis, побудовано частотні характеристики розімкненого контуру одного з каналів стабілізації у вигляді ЛАЧХ, ЛФЧХ та АФЧХ.

Проведено опис ідеї стартап-проєкту та визначений перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару. Згідно відповідних таблиць, в яких зроблено аналіз конкуренції, проведено порівняння сильних та слабких сторін, та оцінено фактори можливостей і потенційних загроз, як таких, що можуть впливати на розвиток проєкту на ранніх стадіях, можна зробити висновок, що обґрунтовані в (табл.10) повинні позитивно вплинути на розвиток проєкту.

Ключові слова: гіроскопічний стабілізатор, система стабілізації, гіростабілізована платформа.

## ABSTRACT

Design types of gyrostabilizers, basic elements, control laws and types of investigated gyroscopic stabilization systems are considered in the work on the research direction "Biaxial gyrostabilizer of indirect action".

The selected mathematical model of the gyrostabilizer includes a model of a stabilized platform with gyroscopes, which are used to determine the angular velocity of the platform's deviation from the equilibrium position. After the analysis and correction of the model according to the task, a software model was built in the Matlab environment. The model consists of a subroutine for the right-hand parts of the dynamics equations and a main program that displays graphs of angular velocities and angles that characterize the dynamic properties of the gyro stabilizer.

Next, using Simulink, the stabilization circuit of the gyro platform around the external axis was calculated, and using the built-in tools, in particular, the Linear Analysis package, the frequency characteristics of the open circuit of one of the stabilization channels were constructed in the form of LAFC, LPFC and APFC.

A description of the idea of a startup project was carried out and a list of weak, strong and neutral characteristics and properties of the idea of a potential product was defined. According to the relevant tables, in which the analysis of the competition is made, the comparison of strengths and weaknesses is made, and the factors of opportunities and potential threats are evaluated as those that can affect the development of the project in the early stages, it can be concluded that the reasons in (Table 10) competitiveness factors should have a positive effect on the development of the project.

**Key words:** gyroscopic stabilizer, stabilization system, gyro-stabilized platform



## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	4
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1.....	12
ГІРОСТАБІЛІЗАТОРИ ЇХ ТИПИ І ПРИЗНАЧЕННЯ.....	12
1.1 Конструктивні види гіростабілізаторів .....	12
1.2 Елементна база двовісних стабілізаторів .....	19
1.3 Закони керування гіростабілізаторами .....	26
1.4 Види досліджуваних систем гіроскопічної стабілізації .....	30
РОЗДІЛ 2.....	34
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОВІСНОГО ГІРОСТАБІЛІЗАТОРА....	34
2.1 Гіростабілізатори координаторів .....	34
2.2 Огляд варіантів схем стабілізаторів.....	40
Схема двовісного двороторного гіростабілізатора осі прецесії гіроскопів якого паралельні осі z стабілізації.....	41
РОЗДІЛ 3.....	51
МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВОВІСНОГО ГІРОСТАБІЛІЗАТОРА....	51
3.1 Моделювання роботи гіростабілізатора за динамічними рівняннями .....	51
3.2 Розрахунок контура стабілізації гіроплатформи навколо зовнішньої осі .....	59
3.3 Аналіз частотних характеристик гіростабілізатора .....	62
РОЗДІЛ 4.....	65
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «Гіростабілізатор координатора для ЛА».....	65
4.1 Опис ідеї та технологічний аудит ідеї проекту .....	65
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	68
4.3 Базові стратегії розвитку та розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	76
4.4 Техніко-економічні характеристики товару .....	79
Висновки до 4 розділу .....	82
ВИСНОВОК.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	85



## ВСТУП

В магістерській дисертації за вибраним напрямком досліджень «Двовісний гіростабілізатор непрямої дії» розглядається сучасний стан розвитку систем стабілізації, які встановлені на рухомих та нерухомих об'єктах наземного, морського та повітряного базування, а також проведено огляд основних методів, які використовуються для вирішення актуального питання вдосконалення процесу стабілізації, в даному випадку з метою покращення точності та швидкодії.

Основні задачі керування літальними апаратами, стабілізації кораблів та інших спеціальних об'єктів можуть бути вирішені за допомогою гіроскопічних приладів і систем. Точність гіроскопічних приладів визначає ефективність стабілізації. Згадані об'єкти, які підлягають стабілізації у заданому напрямку, мають більшу масу і момент інерції, при цьому на них впливають більш динамічні навантаження.

На сьогоднішній день актуальним є вирішення питання підвищення точності та швидкодії таких систем, які встановлюється на визначених об'єктах та особливостями експлуатації яких є наявність впливу зовнішніх збурень, які в свою чергу теж можуть бути різні, наприклад в залежності від умов експлуатації, середовища використання та динаміки руху самого об'єкта, вібраційні збурення від двигуна під час його роботи, а також з недоліками та похибками обладнання чи системи на якій воно встановлене.

**Актуальність** розробки більш стабільної системи стабілізації платформи, полягає в тому, що системи автоматичного керування розроблені на основі стандартного підходу мають велику чутливість до зміни параметрів зовнішнього збурення, а синтезована за критеріями стійкості оптимальна система керування може мати меншу або більшу чутливість до зміни параметрів зовнішніх збурень. Тобто навіть щонайменше відхилення параметрів що мають невизначеність може привести до втрати стійкості та водночас до повної непрацездатності всієї гіростабілізованої платформи. Також більшість систем мають, обмеження у використанні, тобто можуть здійснювати стабілізацію тільки в певному діапазоні

траєкторій руху об'єкта та існують похибки стабілізації, внаслідок наявності конструктивних обмежень на величину керуючого моменту. У даній роботі проводиться удосконалення процесу стабілізації з метою підвищення точності та швидкодії шляхом вибору параметрів контуру керування на основі аналізу стійкості та частотних характеристик.

**Мета роботи** – це підвищення точності стабілізації платформи в умовах сильних зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети роботи вирішуються наступні завдання:

1. Аналіз сучасного стану розробки систем стабілізації платформи.
2. Розробка математичної моделі об'єкту керування – двовісного гіростабілізатора. Аналіз динамічних характеристик об'єкту.
3. Розробка системи, що забезпечує необхідні вимоги по точності та величині керуючого моменту
4. Моделювання та аналіз результатів роботи розробленої системи керування.

**Об'єктом дослідження** є процес керування стабілізованою платформою.

**Предметом дослідження** є система керування стабілізованою платформою.

**Наукова новизна** результатів досліджень:

1. Модифіковано контур керування гіростабілізатором, що дозволяє керувати об'єктом, на який діють зовнішні збурення.
2. Удосконалено модель системи керування двовісним гіростабілізатором з врахуванням обмежень на величину керуючого моменту.

**Практична цінність** полягає в тому, що в роботі розроблено математичне та програмне забезпечення, що дозволяє проводити вибір параметрів контуру керування шляхом чисельного моделювання; отримані результати можуть використовуватись для інших об'єктів, що описуються подібними передатними функціями.

### **Апробація результатів**

Наукові результати обговорювались на конференції "Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"

### **Публікації.**

Матеріали конференції подані та результати опубліковані у збірнику праць ЕАІРП 2022:

**ДВОВІСНИЙ ГІРОСТАБІЛІЗАТОР НЕПРЯМОЇ ДІЇ** . Тищенко Б.Ю.  
– Київ: Збірник праць конференції Ефективність інженерних рішень у -  
приладобудуванні, 2022. – с. 37-39

### **Структура і об'єм дисертації.**

Дисертація містить вступ, 4 розділи серед яких розділ стартап-проєкту, висновок, список літератури який складається з 30 посилань, код виконавчої програми.

## РОЗДІЛ 1

### ГІРОСТАБІЛІЗАТОРИ ЇХ ТИПИ І ПРИЗНАЧЕННЯ

#### 1.1 Конструктивні види гіростабілізаторів

Гіростабілізатор (ГС) – це гіроскопічний пристрій, призначений для стабілізації окремих об'єктів або приладів, а також визначення кутових відхилень об'єктів [1,2,4]. Інерційні системи керування рухомими об'єктами (ракетами, літаками тощо) потребують стабілізації положення чутливих елементів з високою точністю.

Основною задачею гіростабілізатора є стабілізування корисного навантаження у заданій системі координат. Якщо взяти в якості системи координат прямокутну декартову, то в залежності від кількості осей, навколо яких треба стабілізувати положення об'єкту, можна виділити три основних типи ГС – одновісні, двовісні і тривісні.

Серед наявних слідкуючих систем навігації найбільшої популярності здобули двовісні та тривісні системи, в свою чергу, одновісні ГС є менш популярними. Системи будуються на зовнішніх та внутрішніх карданних підвісах.

Поєднання двох одновісних гіростабілізаторів створює двовісний, який стабілізує платформу відносно площини горизонту, також прилад можна застосовують як гіровертикаль силового типу. Поєднання трьох одновісних – дає тривісний силовий гіростабілізатор, його ще можна назвати гіроазимутгоризонт – пристрій, що складається з гіроскопа напрямку (гіроазимута) і гіровертикалі (гірогоризонта). Він служить для вимірювання трьох кутів, що визначають орієнтацію об'єкта, і застосовується на кораблях і літаках. Трьохвісний стабілізатор використовується також для просторової стабілізації платформи (гіростабілізована платформа).

У системах управління балістичними ракетами ньютонметри зазвичай стабілізують щодо нерухомої у просторі системи координат, у системах управління іншими рухомими об'єктами – щодо деякої системи координат, що обертається.

Також ГС використовують і для вимірювання кутових відхилень об'єктів, тобто вони можуть виконувати роль систем орієнтації.

За принципом стабілізації ГС можна поділити на:

- ГС безпосереднього типу, що стабілізуються безпосередньо гіроскопом; такі ГС як правильно одновісні і є звичайним триступеневим гіроскопом з великим кінетичним моментом;
- ГС силового типу, у яких стабілізація здійснюється гіроскопом спільного зі стабілізуючим двигуном. Чутливим елементом силового ГС є двоступеневий гіроскоп;
- ГС індикаторно-силового типу, в яких стабілізація здійснюється переважно стабілізуючим двигуном. Чутливим елементом індикаторно-силового ГС може бути інтегруючий поплавковий гіроскоп, датчик кутової швидкості або інтегродиференціюючий гіроскоп;
- ГС індикаторного типу, у яких стабілізація здійснюється стабілізуючим двигуном, а гіроскоп є лише вимірювачем відхилення від необхідного положення. Його чутливим елементом є триступеневий гіроскоп або гіроскоп, що динамічно налаштовується.

Безпосередні гіростабілізатори (БГС) – це пристрої, в яких безпосередньо застосовується стабілізуюча дія триступеневого гіроскопа [1, 4], тобто поставлене завдання стабілізації виконують, використовуючи тільки гіроскопічний момент для повної або часткової компенсації моменту збурення, що діє на об'єкт стабілізації. Як приклад побудови БГС наведено стабілізатор хитавиці для помірної бортової хитавиці корабля, так званий, заспокоювач хитавиці Шліка, кінематичну схему якого наведено на рис.1.1.

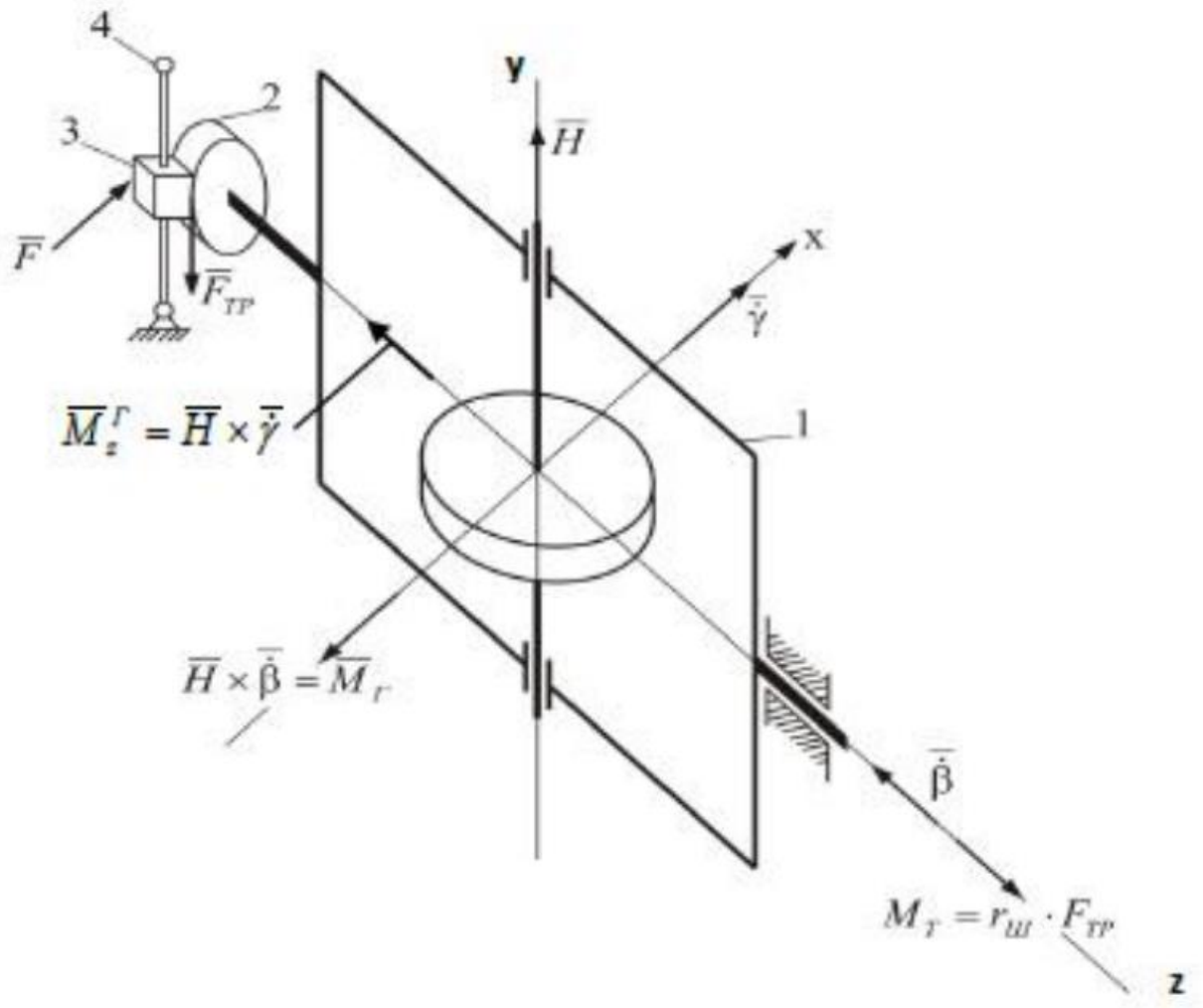


Рисунок 1.1 Кінематична схема БГС (заспокоювач хитавиці Шліка)

БГС часто застосовуються в якості заспокоювачів бортової хитавиці корабля, стабілізаторів вагонів однорейкового потяга та ін. (вага і габарити подібних гіростабілізаторів дуже великі), а також для стабілізації чутливих елементів систем управління.

В кінематичній схемі на рис. 1 введені такі позначення:

- Гіроблок з двома ступенями свободи;
- Гальмівний шків;
- Гальмівна колодка;
- Важіль для регулювання сили притискання (  $F$  ) колодки до шків. Коли колодка притискається до шків, то створюється сила тертя  $F_{тр}$  і момент тертя  $M_{тр}$  щодо осі підвісу гіроблока;

$x$  – поздовжня вісь об'єкта. Коли є бортова хитавиця то коливання відбуваються навколо поздовжньої осі. Момент який спрямований по осі стабілізації, у даній конструкції створюється тільки гіроскопом, що означає, що даний пристрій є безпосереднім одновісним ГС.

Приведений гіростабілізатор на рис.1.2, що складається з гірокамери 1 з ротором, встановленої в зовнішньому кардановому кільці (рамі) 2, здійснює безпосередню стабілізацію антени 3 і координатора 4. Координатор виробляє сигнали, пропорційні кутам відхилення осі антени від заданого напрямку ОА. Ці сигнали через підсилювач і перетворювач 5 і 6 - надходять на датчики моментів 7 і 8 системи корекції, що здійснює автоматичне стеження осі антени за необхідним напрямком. Подібні пристрої називають гіроскопічними слідкуючими системами.

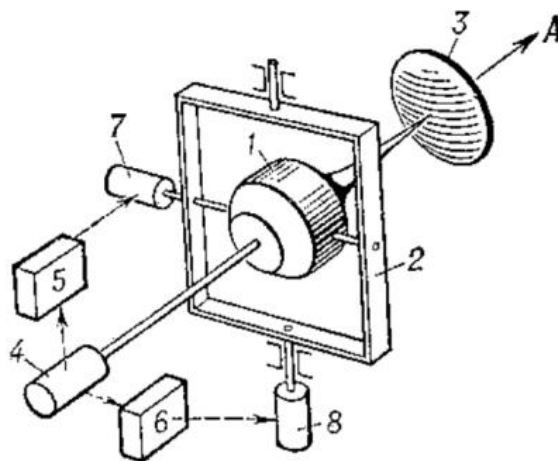


Рисунок 1.2 Принципова схема гіроскопічної слідкуючої системи: 1 – гірокамера з ротором; 2 – зовнішнє карданове кільце; 3 – антена; 4 – координатор; 5,6 – підсилювач; 7,8 – датчик моменту.

Індикаторні гіростабілізатори — автоматизовані системи керування, в яких чутливими або задаючими елементами, що визначають положення об'єкта та керують сервомеханізмами, є гіроскопічні пристрої, встановлені на об'єкті, що стабілізується (наприклад, платформі). Стабілізація об'єкта (платформи), однак, здійснюється сервомеханізмами. В якості чутливих елементів, що реагують на кутові швидкості або на кути відхилення платформи, використовуються гіроскопи з двома ступенями свободи (наприклад, інтегруючі флотаційні гіроскопи) і швидкісні гіроскопи або вільні астатичні гіроскопи. Індикаторні гіростабілізатори

використовуються в інерціальних навігаційних системах, встановлених на кораблях і літаках.

Тобто в ІГС компенсація збурюючого моменту відбувається повністю за рахунок моменту який створюється двигуном розвантаження, так як збурюючий момент, прикладений до об'єкта стабілізації, не призводить до прецесії гіроскопа [1].

Індикаторно-силові гіростабілізатори за кінематичною схемою схожі по відношенню до СГС, але збурюючий момент в основному компенсується моментом який створюється двигуном розвантаження. Якщо момент двигуна буде рівний нулю, то гіроскопічний момент не зможе повністю компенсувати момент збурення на відміну від СГС [1, 2, 4, 13].

Розрізняють також ГС по типу приводу (контур пристроїв), який за допомогою виконавчого двигуна створює момент розвантаження. Існують наступні типи приводу [1]:

- Електричний привід (ЕП);
- Електропневматичний привід (ЕПП);
- Електрогідравлічний привід (ЕГП).

В залежності від факторів навантаження, потужності, яку привід повинен розвивати для компенсування моменту збурення, вибирається відповідний тип приводу. Найбільшу питому потужність мають ЕГП, тому що на відміну від інших приводів його маса та габарити менше при однаковій потужності. Даний тип приводу застосовується для стабілізації гарматного ствола танка.

Електропневматичний тип приводу (ЕПП) має певні переваги перед ЕГП, починаючи з того, що насамперед його зручніше використовувати, тому що в ньому відсутнє мастило. Електричний привід зручніше в експлуатації тому що не містить додаткових рідин та газів.

Можна виділити два основних приводи за типом струму, це приводи з постійним струмом і приводи зі змінним струмом. Можуть використовуватись як з редуктором так і без нього.

В залежності від наявності редуктора у контурі стабілізації може використовуватись як один так і два стабілізуючих мотора на одну вісь стабілізації.

Силкові гіростабілізатори (СГС або гірорами) - електромеханічні пристрої, які містять в собі гіроскопи та спеціальні двигуни для подолання впливу, на стабілізуючий об'єкт, зовнішніх збурюючих моментів [1, 2, 4, 13]. Застосовуються на кораблях, літальних апаратах та інших об'єктах, щоб стабілізувати положення об'єкту. За принципом силової гіроскопічної стабілізації також працюють деякі типи гіроскопів напрямку, гіровертикалей і комбінованих пристроїв, так званих гіроазимутгоризонтів. Силкові гіростабілізатори можуть бути одногіроскопними і двохгіроскопними - залежно від числа гіроскопів в рамі, а по числу осей стабілізації – одновісними, двовісними і тривісними. Схема одного з них наведена на рис.1.3.

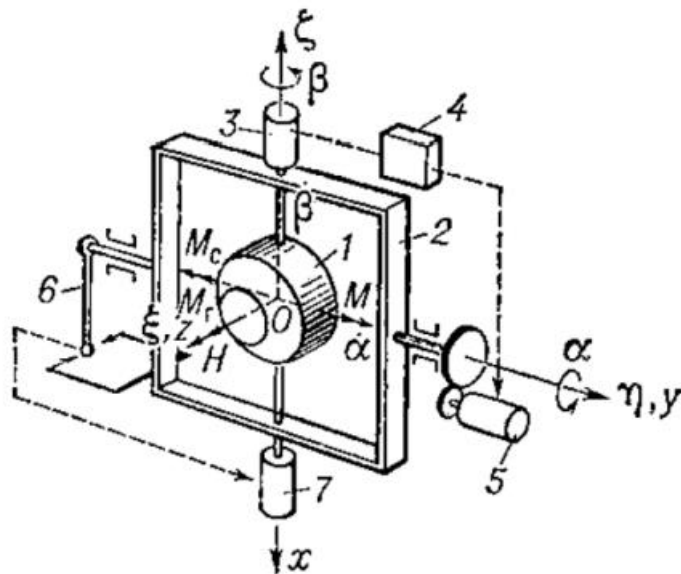


Рисунок 1.3 Принципова схема одновісного силового гіростабілізатора з одним гіроскопом: 1 — гірокамера з ротором; 2 — рама; 3 — датчик кута; 4 — підсилювач; 5 — стабілізуючий двигун; 6 — маятниковий коректор; 7 — датчик моменту;  $O\xi\eta\zeta$  — вісі системи відліку;  $Oхуz$  — вісі, зв'язані з гірокамерою;  $Oх$  — вісь прецесії;  $O\eta$  — вісь стабілізації;  $\alpha$  — похибка стабілізації;  $\beta$  — кути прицесії.

Основним елементом одновісного силового стабілізатора з одним гіроскопом, є гірокамера з ротором 1; рама 2, яка відіграє роль зовнішнього карданового кільця

і жорстко зв'язана із стабілізуючим об'єктом; датчик кута 3, встановлений на осі прецесії  $Ox$ ; підсилювач 4; стабілізуючий двигун 5, призначений для застосування відносно осі стабілізації  $Oy$  моментів, що компенсують діючі на раму зовнішнього збурюючого моменту; маятник-коректор 6 і датчик моментів 7, що є елементами системи корекції.

Гіростабілізатор містить на собі чутливі елементи, в ролі яких можна використовувати такі гіроскопічні прилади, як датчик кутових швидкостей, поплавковий інтегруючий гіроскоп, динамічно налаштований гіроскоп, волоконно-оптичний гіроскоп, мікромеханічний гіроскоп, вібраційний гіроскоп і т.д. Спрощена кінематична схема наведена на рис.1.4.

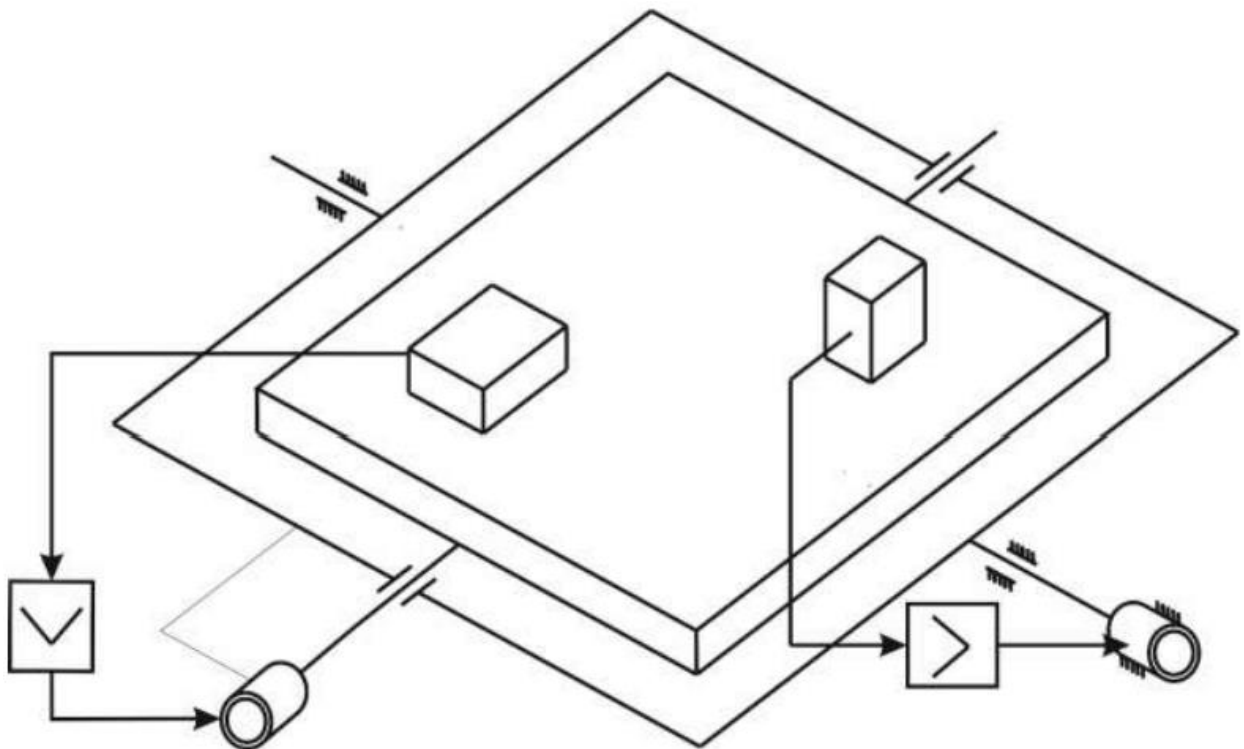


Рисунок 1.4 Кінематична схема гіростабілізатора

Далі будуть розглянуті деякі варіанти для покращення результатів, наприклад волоконно-оптичний та мікромеханічний гіроскопи, вони мають малу точність, але при цьому мають малі габарити, масу та мале енергоспоживання, що необхідно для виконання визначених задач.

## 1.2 Елементна база двовісних стабілізаторів

Підшипники осі зовнішнього каркаса карданної підвіски одновісного гіростабілізатора встановлені на об'єкті, тому під час обертання об'єкта навколо центру його ваги вісь зовнішнього каркаса гіростабілізатора повертається в простір. У цьому випадку в результаті ефекту некомутативності кінцевих обертів виникає перша фактична швидкість гіропрецесії [1, 2, 13].

Більш досконалим є двовісний гіростабілізатор, як зазначав вище, він призначений для стабілізації платформи в заданій площині. У двовісному гіростабілізаторі два одновісних гіростабілізатора з'єднані в єдину систему, принцип дії кожного з яких не відрізняється від принципу дії одновісного гіростабілізатора або гірокаркаса. Платформа двовісного гіростабілізатора має два ступені свободи відносно літального апарату, а обертання платформи навколо осі, перпендикулярної до площини, з якої складаються осі стабілізації, відбувається разом з літальним апаратом.

Обертання літальних апаратів навколо осі, перпендикулярній площині, з якої складаються вісі стабілізації ГС, чинять збурюючу дію на платформу ГС, що зумовлює фактичну швидкість прецесії платформи та відхилення платформи від заданої площини стабілізації.

Також їх можуть застосовувати для створення силових гіровертикалей літаків або системи самонаведення зенітних ракет. Гіровертикалі силового типу використовують для визначення кутів крену та тангажу. Залежно від числа гіроскопів, що застосовуються, розрізняють двогіроскопні і чотиригіроскопні гіровертикалі [1, 2, 13].

Самонаведення – це спосіб управління, у якому сигнали, необхідних наведення ракети на ціль виробляються в апаратурі ракети зарахунок відображення чи випромінювання якогось виду енергії.

Пристрої, що виробляють інформацію про рух цілі, називають головкою самонаведення. Для формування сигналів керування головка самонаведення повинна автоматично стежити за ціллю і бути нечутливою до коливань ракети. Для

виконання цього завдання застосовується двовісний гіростабілізатор з чотирма гіроскопами.

Гіростабілізатор працює у двох режимах – стабілізації та стеження за метою.

Основними збурюючими моментами, що діють навколо осей стабілізації, є [1]:

- а) моменти «тяжіння» дротів;
- б) моменти тертя, що виникають в опорах осей карданового підвісу ГС
- в) інерційні моменти, що виникають під час руху «обкатки» та при карданному повороті рамок карданового підвісу, що породжуються обертанням з прискоренням роторів електродвигунів розвантаження;
- г) інерційні моменти платформи та рамок карданового підвісу, що виникають при поворотах корпусу ГС внаслідок геометричної похибки кардану;
- д) інерційні моменти, що виникають при статичній незбалансованості елементів ГС в режимі польоту, що не встановився.

Стабілізація полягає у визначенні параметрів кутового положення платформи з приладами і вироблення сигналів управління відповідно, що забезпечують необхідне положення платформи у вибраній системі координат. Для визначення параметрів положення платформи, зазвичай застосовують гіроскопи. На платформі двовісного ГС встановлюються два мікромеханічні (волоконнооптичні) гіроскопи. Далі на рис.1.5 зображена кінематична схема ГС.

Перевага двовісних гіростабілізаторів полягає в тому, що гіроскопи, встановлені на платформу гіростабілізатора, при будь-яких поворотах літального апарату повертаються навколо осей прецесії лише на невеликі кути.

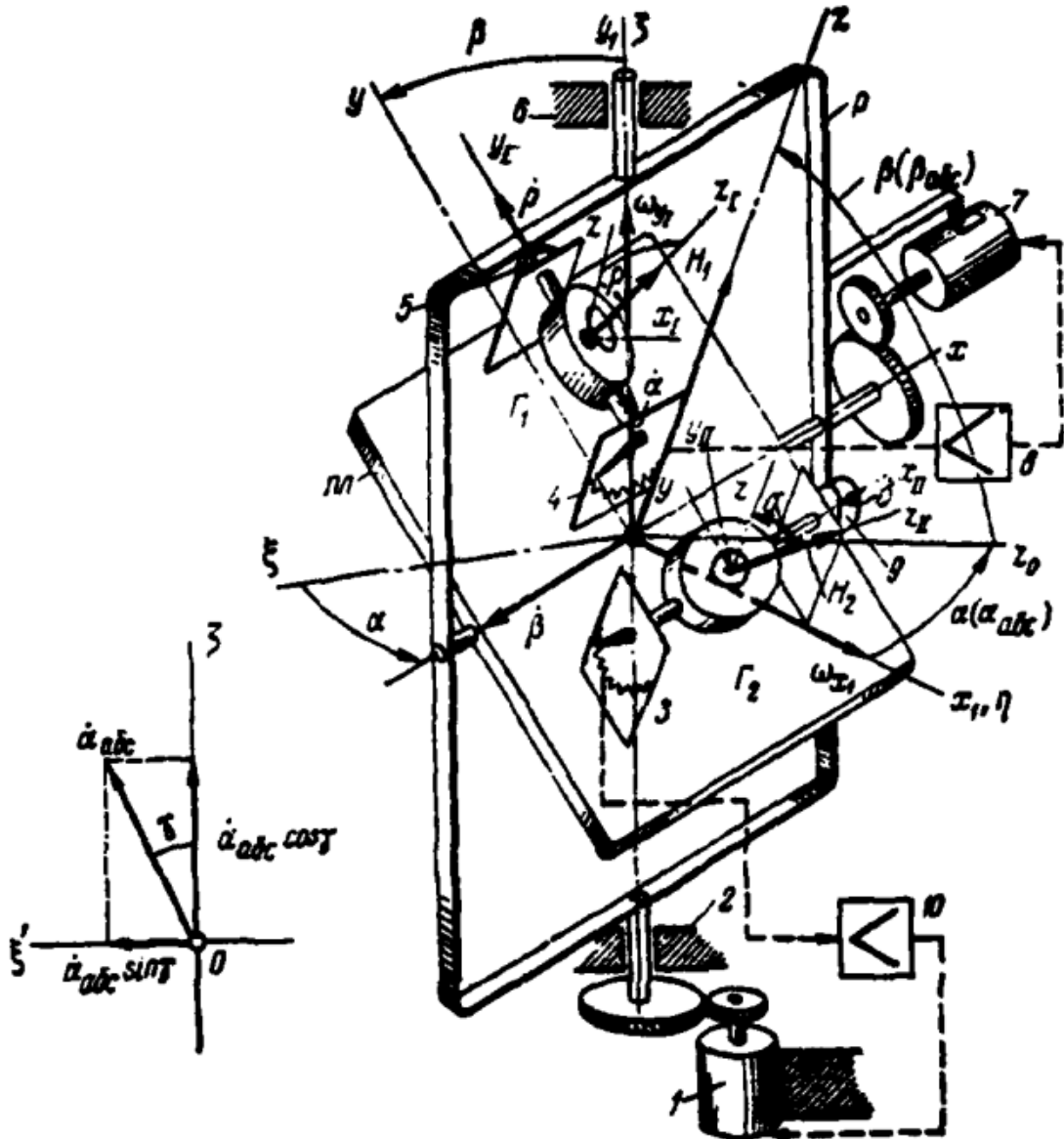


Рисунок 1.5 Схема двовісного двороторного гіростабілізатора, осі гіроторів якого паралельні стабілізованій осі Z платформи.

У цьому випадку полегшується балансування гіроскопів навколо осей прецесії, розширюються можливості прийняття конструктивних заходів для зменшення моментів тертя підшипників і пружних моментів від поточних входів, які діють навколо осей прецесії та які очікують фактичної швидкості прецесії платформи ГС [2, 13].

В залежності від потреби у вирішенні конкретної задачі здійснюється вибір схеми, параметрів, конструктивної постановки та умови експлуатації. У цьому випадку умов експлуатації в ЛА, особливо великий вплив на точність

гіростабілізатора мають перевантаження, що виникають у процесі польоту, кутові коливання літального апарату та місця  $S$  – кріплення корпусу гіростабілізатора.

На рис.1.6 зображена схема двовісного гіростабілізатора. Карданний підвіс гіростабілізатора складається з платформи  $P1$ , яка є внутрішнім каркасом підвіски кардана  $P$ , і зовнішнього каркаса, підвішеного в корпусі на підшипниках 2 і 6. На платформі  $P1$  встановлені два гіроскопи  $G$  і  $G_2$ , кожен з яких має відносно себе два ступені свободи (обертання ротора гіромотора та обертання його сорочки). За допомогою датчиків кутів прецесії 3 і 4 визначаються кути повороту оболонок гіромоторів  $G$  і  $G_2$  відносно платформи.

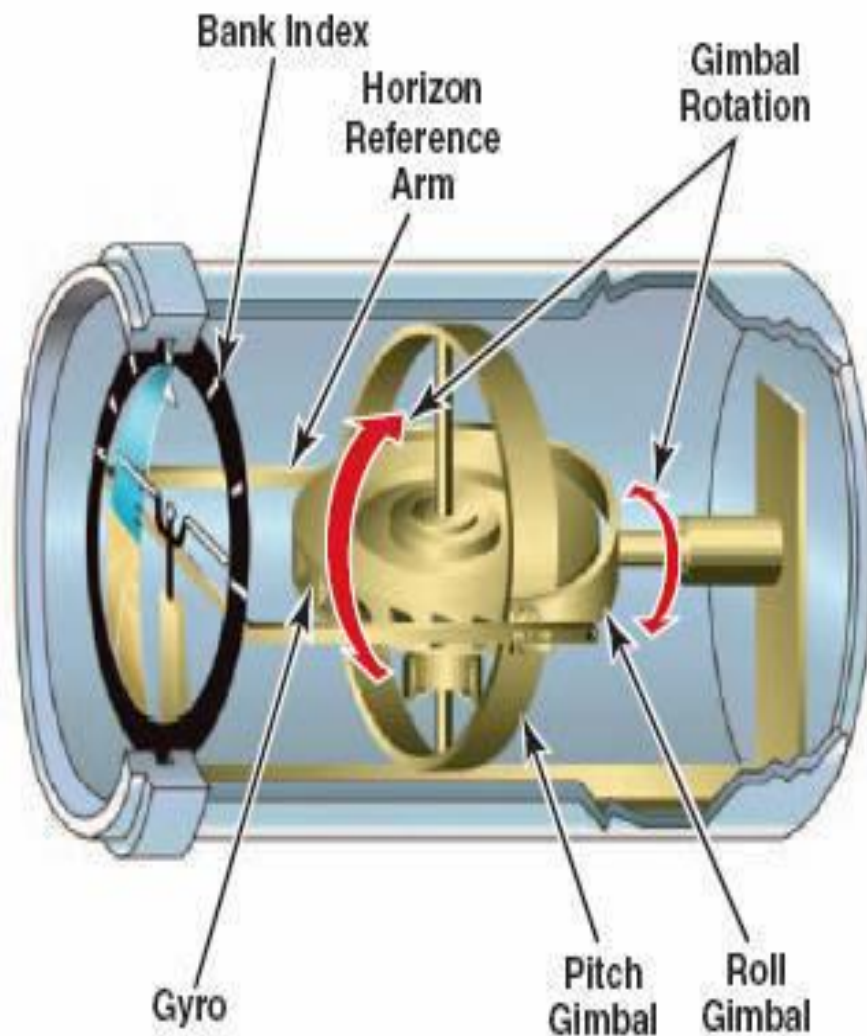


Рисунок 1.6 Концепція конструкції центрального гіроскопічного горизонту (двовісного двороторного силового гіростабілізатора).

Сигнали, отримані від датчиків 3 і 4, через підсилювачі 8 і 10 надходять на відповідні двигуни 1 і 7 розрядки. Для корекції положення платформи P1 служать датчики моментів 5 і 9, що створюють моменти відносно осей прецесії гіроскопів.

Конструктивна концепція двовісного двороторного гіростабілізатора, який є центральним гіроскопічним горизонтом, наведена на рис.1.7. Також застосовуються гіростабілізатори з чотирма гіромоторами, зображено на рис.1.8.

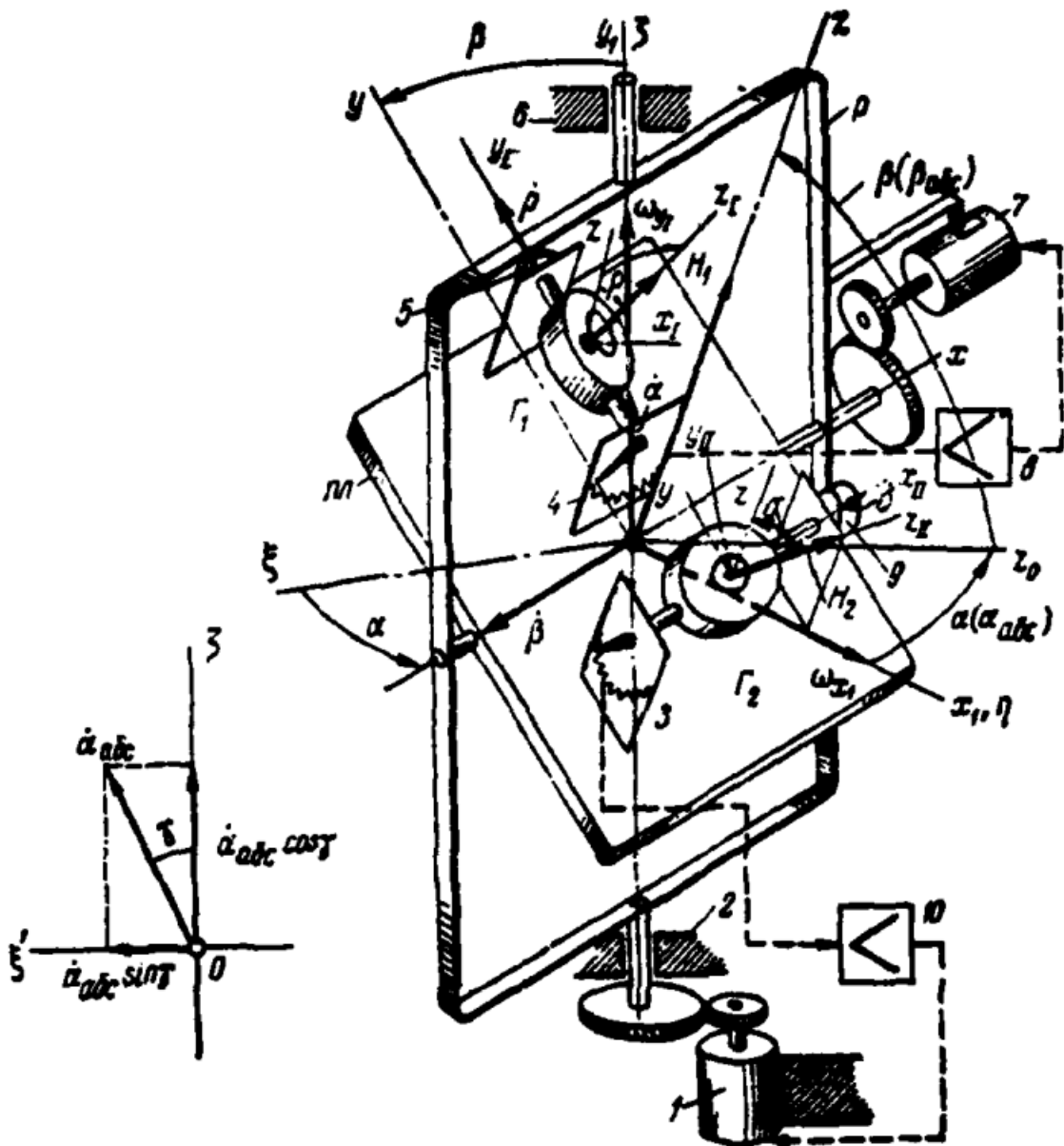


Рисунок 1.7 Схема двовісного двороторного гіростабілізатора, осі гіророторів якого паралельні стабілізованій осі Z платформи.

Кожухи гіромоторів  $G, i G', G, i G'$ , встановлених на платформі  $Pl$ , попарно з'єднані з квадрантами  $I$  зубчастих коліс або системами антипаралелограмних важелів так само, як в одновісних гірорамах.

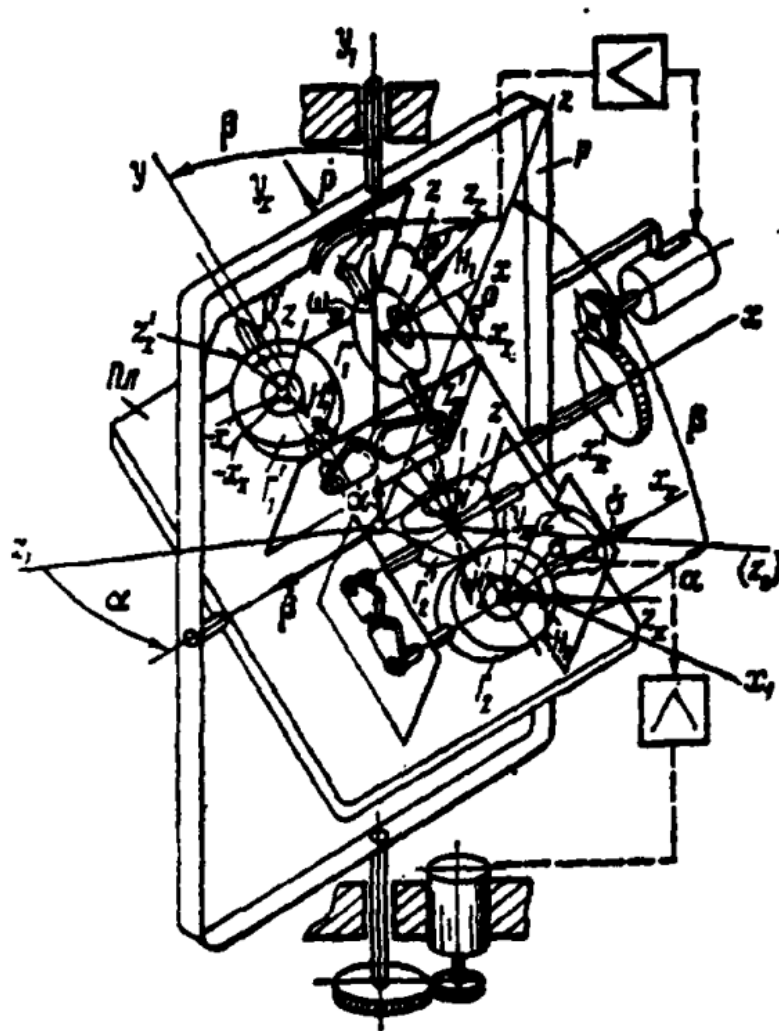


Рисунок 1.8 Схема двовісного чотирьоторного гіростабілізатора, осі гіроторів якого паралельні стабілізованій платформі осі  $Z$ .

Крім наведеного на рис.1.8, розташування гіроскопів на платформі гіростабілізатора, також можливе їх розташування, при якому осі прецесії відповідних гіроскопів спрямовані паралельно осі  $Z$ , стабілізованій в просторі (рис. 1.9 та рис.1.10).

Призначення двовісного гіростабілізатора полягає в тому, щоб при еволюціях літака, на якому він встановлений, утримувати незмінним (постійним) в абсолютному просторі напрямок осі  $Z$ , перпендикулярний площині платформи  $Pl$ .

Рух платформи навколо осі  $Z$  не стабілізовано і платформа повертається навколо цієї осі разом з літаком. У цьому випадку обертання літака спричиняють відхилення каркаса карданної підвіски гіростабілізатора в абсолютному просторі, що призводить до виникнення моментів інерції, які разом з моментами опорного тертя осей каркаса карданної підвіски є моментами зовнішніх сил щодо гіроскопів, встановлених на платформі[13].

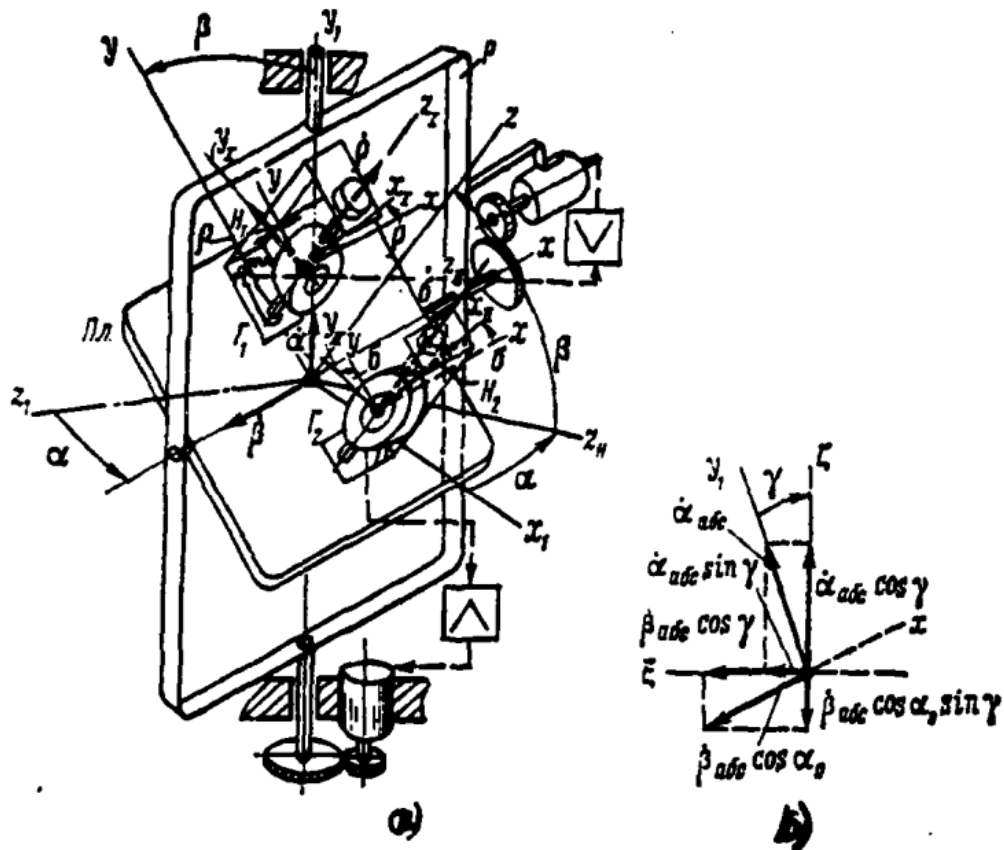


Рисунок 1.9 Схема двовісного дворотного гіростабілізатора, осі прецесії гіроскопів якого паралельні стабілізованим платформам осі  $Z$ .

Зміщення гіроторів відносно платформи  $Pl$  і рухливе обертання платформи навколо своєї осі  $Z$  разом з літальним апаратом у поєднанні з дією рельєфного механізму призводять до відхилення стабілізованої осі  $Z$  платформи в абсолютному просторі.

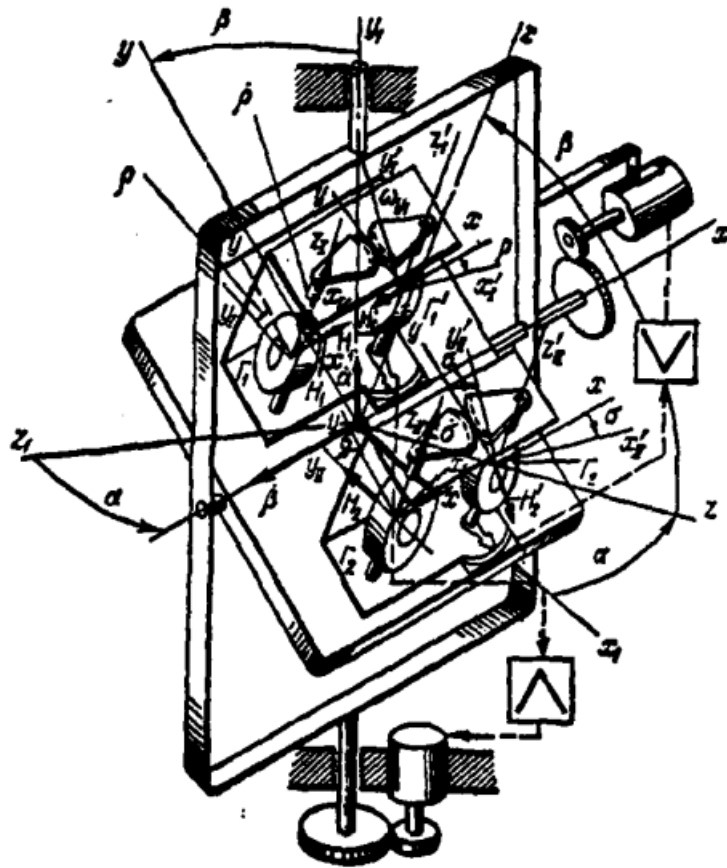


Рисунок 1.10 Схема двовісного чотирироторного гіростабілізатора, осі прецесії гіроскопів якого паралельні стабілізованим платформам осі  $Z$ .

Зміщення гіроторів відносно платформи  $Pl$  і рухливе обертання платформи навколо своєї осі  $Z$  разом з літальним апаратом у поєднанні з дією рельєфного механізму призводять до відхилення стабілізованої осі  $Z$  платформи в абсолютному просторі.

### 1.3 Закони керування гіростабілізаторами

Провівши огляд літератури, було знайдено декілька рішень задачі керування виконавчими двигунами гіростабілізаторів для камери. Як правило більшість таких систем використовують класичний ПД-регулятор, який зображений на рис.1.11.

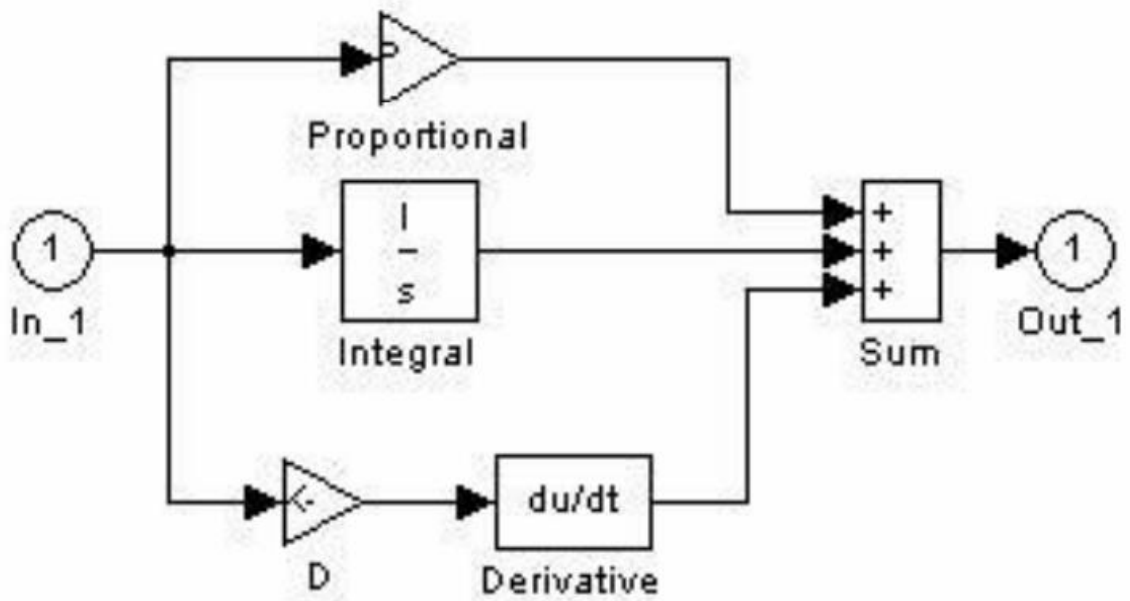


Рисунок 1.11 Схема класичного ПІД-регулятора

В міжнародному журналі контролю та автоматизації [9,10,14], було запропоновано використання інтелектуального ПІД-регулятора, що на рис.1.12.

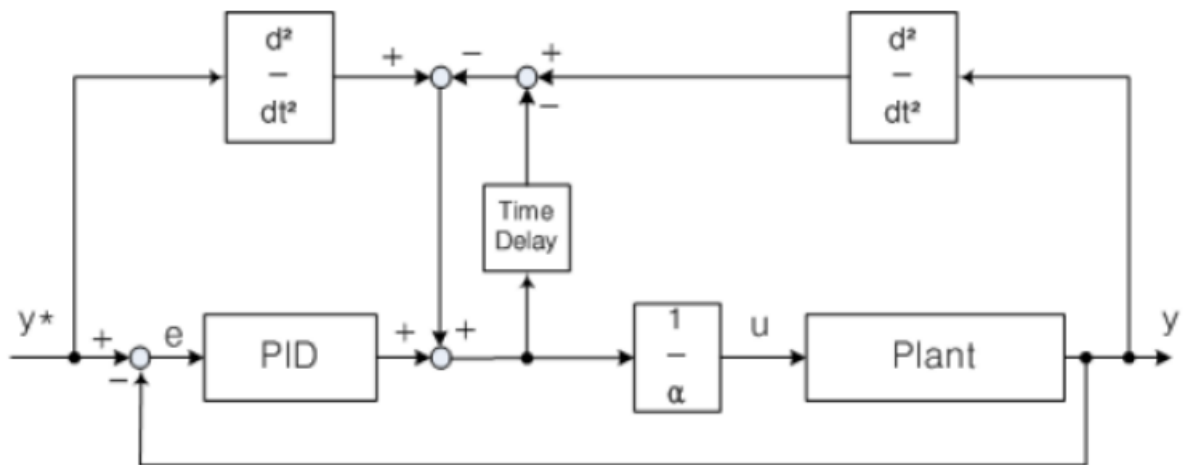


Рисунок 1.12 Схема інтелектуального ПІД-регулятора

Така система відрізняється від класичної тим, що при її використанні параметри та налаштування регулятора постійно корегуються, що позитивно відображається на роботі всієї системи. Авторами було проведено порівняння роботи двох регуляторів, графіки яких представлено на рис.1.13 та рис.1.14 відповідно.

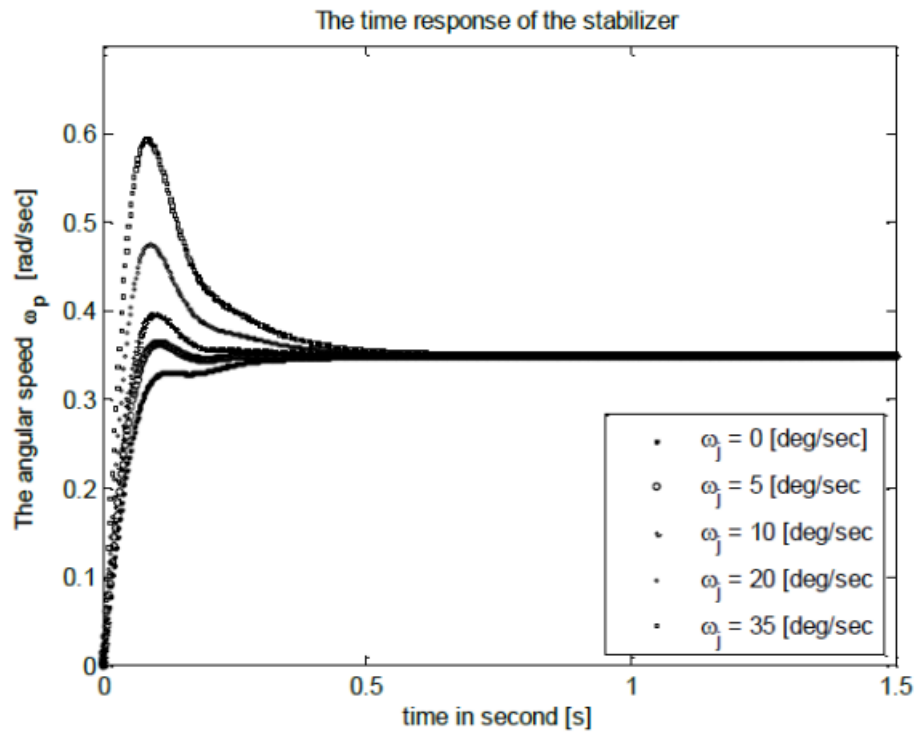


Рисунок 1.13 Робота класичного ПІД-регулятора

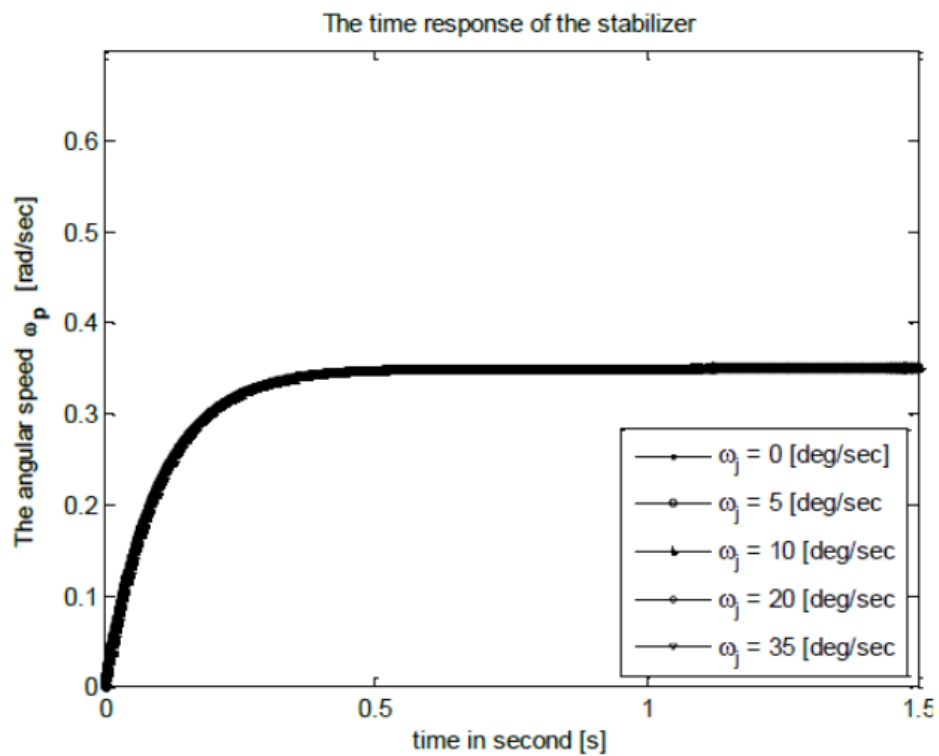


Рисунок 1.14 Робота інтелектуального ПІД-регулятора [9,10, 14]

З графіків видно, що при використанні класичного ПІД-регулятора з постійними параметрами, перехідна характеристика змінюється в залежності від вхідного навантаження, а саме зі збільшенням кутової швидкості – збільшується

перерегулювання системи, що призводить до нестабільної роботи регулятора при різних навантаженнях. При використанні регулятора з корегованими параметрами, що на рис.1.14, перехідна характеристика представлена у вигляді аперіодичного процесу, яка не залежить від величини вхідної кутової швидкості. Використання такого ПД-регулятора дозволить підвищити стабільність та якість роботи всієї системи.

Окрім ПД-регулятора для керування двигунами стабілізації використовують і інші. Наприклад Вільям Дж. Біглі та Вінсент Дж. Ріццо з Lockheed Electronics представили свою роботу [14, 18], в якій використали лінійно-квадратичної теорії керування. Вони запропонували ввести в систему, для керування двигунами, лінійноквадратичний регулятор, модель якого наведена на рис.1.15.

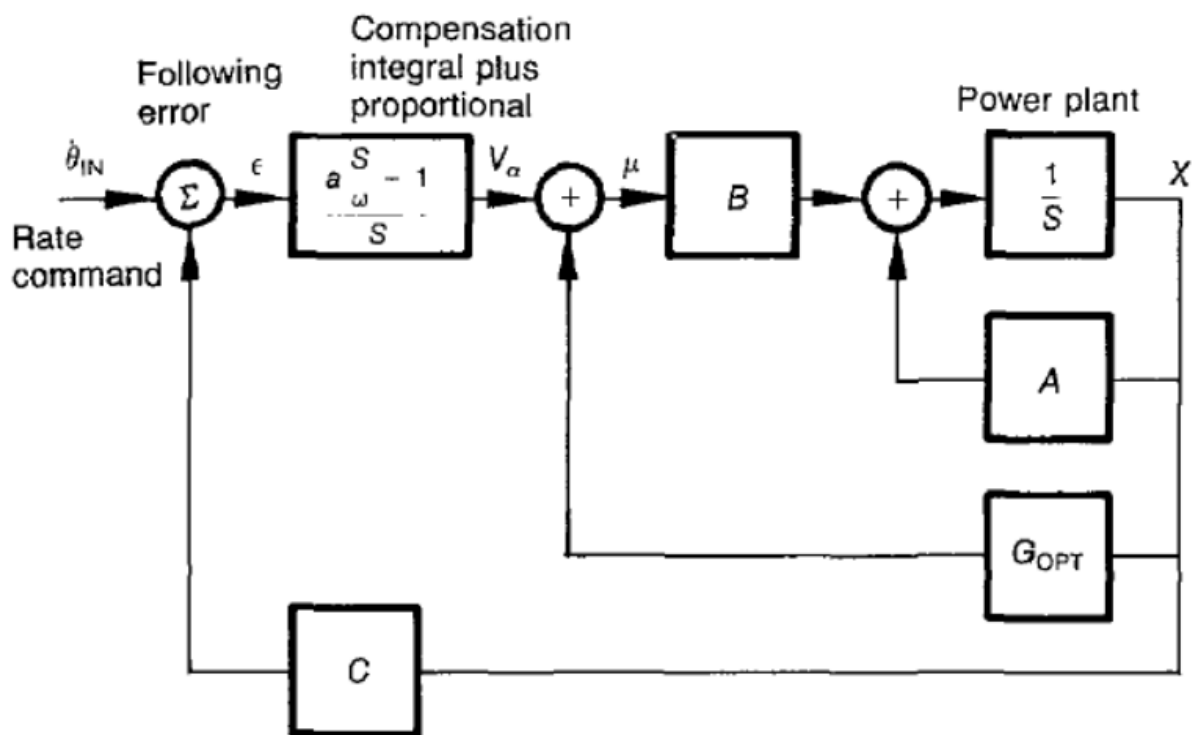


Рисунок 1.15 Модель лінійно-квадратичного регулятора

Таке рішення було продиктовано тим, що масивні інерційні системи схильні до низькочастотного резонансу, ефекту насичення та тертю. Проблема резонансу обмежує смугу пропускання та викликає нестабільність роботи усієї системи. А ефект насичення викликає збільшення часу синхронізації, а відповідно збільшу помилку позиціонування. Таким чином авторами було досягнуто покращення ЛАЧХ досліджуваної системи, результат зображено на рис.1.16.

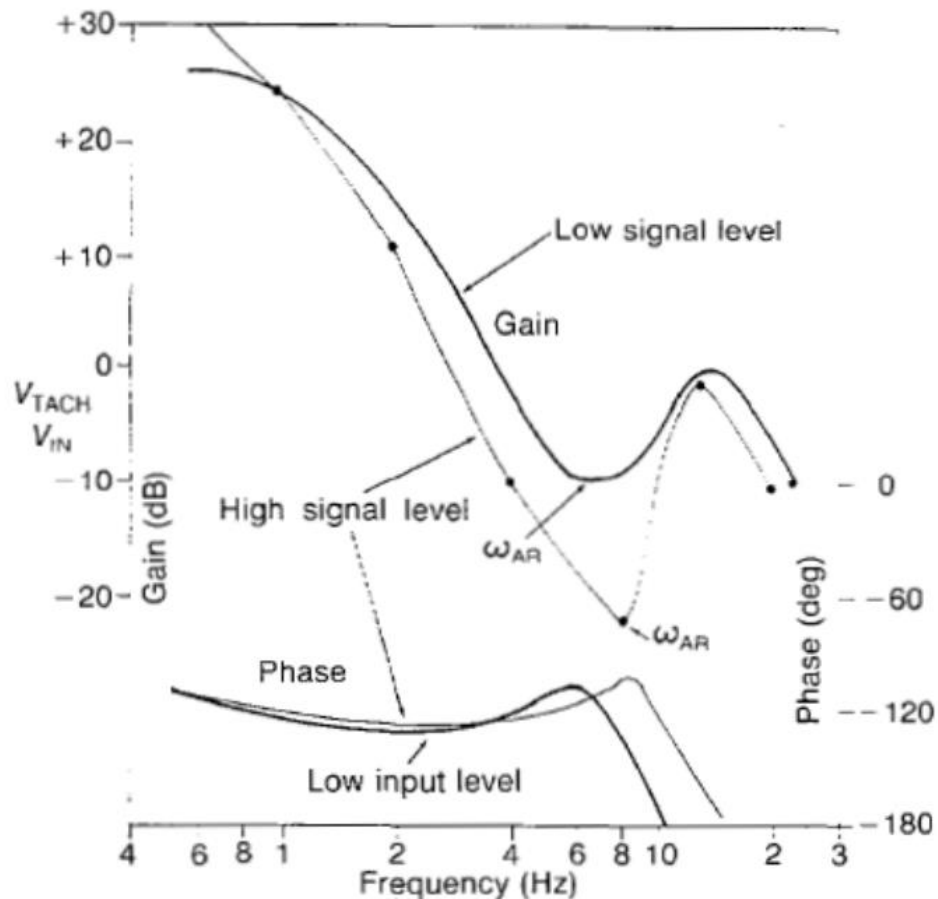


Рисунок 1.16 ЛАЧХ системи з використанням лінійно-квадратичного регулятора

В результаті використання лінійно-квадратичного регулятора авторам вдалося значно розширити смугу пропускання, що вирішило проблему низькочастотного резонансу, вдалося зменшити насичення та час синхронізації, цим самими зменшити похибку позиціювання.

#### 1.4 Види досліджуваних систем гіроскопічної стабілізації

В якості системи гіроскопічної стабілізації розглядається система автоматичного регулювання, забезпечує збереження певної кутової орієнтації на рухомому об'єкті визначеного тіла відносно системи координат, вісі яких певним чином орієнтовані в просторі. Ця система координат є опорною або ж нерухомою. Залежно від конкретної задачі це може бути, наприклад, інерційна система

координат чи система, вісі якої направлені по сторонам світу і по вертикалі місця, де знаходиться рухомий об'єкт.

Система стабілізації забезпечує постійність кутів між осями нерухомої системи координат та осями, жорстко зв'язаної з тілом, що стабілізується [5, 6]. Платформа що стабілізується кінематично зв'язана з системою кілець і осей (кардановий підвіс). Розташування та число осей (одна, дві, три та більше) залежить від призначення самої системи.

На рис.1.17 в якості прикладу зображена стабілізуюча платформа П у двовісному підвісі [6]. Зовнішня сторона А-А підвісу зв'язана з об'єктом що рухається. Оптична вісь телескопу Т, встановленого на платформі, повинна бути безупинно направлена на зірку при будь-яких положеннях об'єкту що рухається.

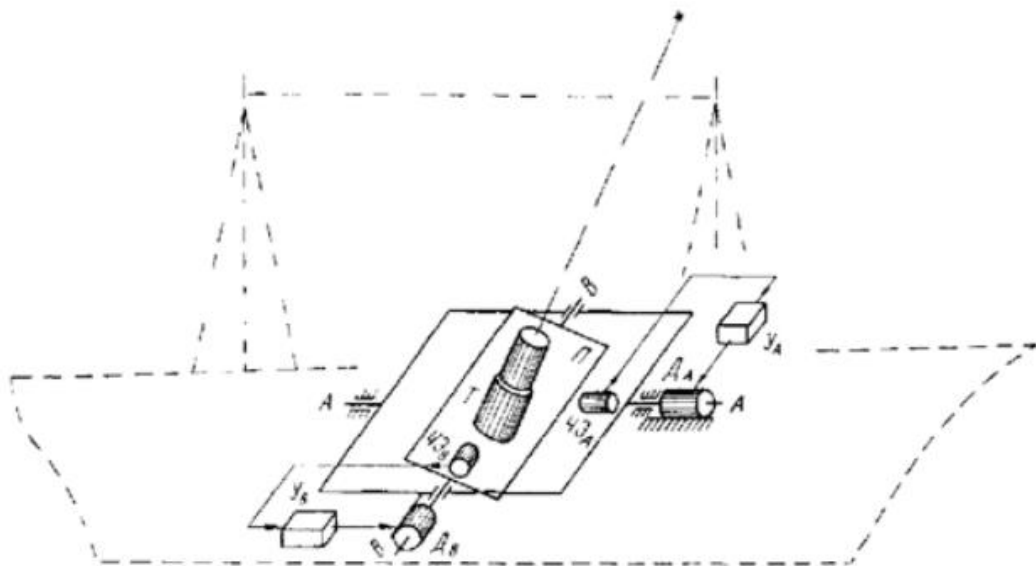


Рисунок 1.17 Платформа що стабілізує рухомий об'єкт

Оскільки будь-яке кутове положення телескопу в просторі може бути отримане поворотом його навколо трьох осей, а оскільки поворот телескопу навколо напрямлення на зірку не грає ролі, в даному випадку достатньо забезпечити поворот платформи відносно рухомого об'єкту навколо двох осей.

Відхилення платформи від необхідних кутових положень відносно осей АА та В-В виявляються чутливими елементами ЧЕА та ЧЕВ. Кожен чутливий елемент керує відповідним виконуючим двигуном Д через посилювач У. Між двигуном та

віссю підвісу зазвичай є редуктор не показаний на рисунку. Таким чином, по кожній із осей є окремий канал керування.

Системи стабілізації, в яких стабілізуються моменти створюються тільки виконуючими двигунами чи іншими виконуючими пристроями, а момент гіроскопічної реакції гіроскопів не використовуються для безпосередньої компенсації моментів, збурюючих платформу, таку систему називають системою непрямой стабілізації. Гіроскопічні елементи в системах непрямой стабілізації можуть використовуватися лише для виявлення відхилень платформи від заданого положення і для формування керуючих сигналів [6].

Окремий вид являють собою багатоступінчасті стабілізатори, серед яких практичне значення мають системи двоступеневої стабілізації. В такій системі, розглянута вище платформа є елементом першого ступеня стабілізації. На ній окремо встановлюється в окремому кардановому підвісі друга платформа. Це друга ступінь стабілізації, помилки що збурюють стабілізацію першої платформи. Друга платформа стабілізується в просторі з більш високою точністю, ніж перша.

## **Висновок до 1 розділу**

У першому розділі розглянуто класифікацію гіростабілізаторів за кількістю осей стабілізації та їх призначенням відповідно, було зроблено огляд та порівняння існуючих систем стабілізації, також описані різні типи гіростабілізаторів, їх властивості та методи стабілізації.

В розділі наведено схеми деяких гіростабілізаторів, розглянуто класичні конструкції карданового підвісу, які забезпечують різні ступені свободи, та описана елементна база їхніх конструкцій, де більше приділена увага двовісному гіростабілізатору.

Опрацювавши достатню кількість статей, було розглянуто закони керування за допомогою класичного ПД-регулятора, та лінійно-квадратичного регулятора так як провівши огляд літератури по даній тематиці для отримання інформації про системи стабілізації обладнання, стабілізуючі платформи, було помічено, що

застосовується класичний ПД-регулятор. В результаті можна сказати, що на даний момент активно проводиться робота по покращенню законів керування виконавчими двигунами в тому числі, так як і вдосконаення самого процесу стабілізації.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОВІСНОГО ГІРОСТАБІЛІЗАТОРА

#### 2.1 Гіростабілізатори координаторів

В даному розділі розглядається використання гіростабілізаторів для отримання на ЛА інформації, необхідної для реакції метода пропорційної навігації при наведенні ЛА на об'єкт наведення(ОН). Основна інформація для здійснення цього методу – інформація про абсолютну кутову швидкість повороту лінії візування об'єкта наведення (с ЛА). Призначення гіростабілізатора в сукупності з координатором – це вимірювання на ЛА абсолютної кутової швидкості лінії візування  $\omega_{Л.В.}$ .

Принцип отримання такої інформації заключається в наступному. Кординатор направляє на об'єкт таким чином, щоб сигнал від об'єкта пеленгації поступав на приймач. Отриманий сигнал кординатор перетворює в електричний, пропорціональний куту між направленням на об'єкт пеленгації і віссю рівносигнальної зони (ОРЗ) кординатора. Ці сигнали поступають на виконавчі пристрої, повертаючи кординатор таким чином, щоб ОРЗ кординатора постійно співпадала (з визначеною степіню точності) з лінією візування [21, 22].

При такому «слідкуванні» кординатором за лінією візування кутова швидкість поворота кординатора відносно інерціального простору рівна кутовій швидкості поворота лінії візування  $\omega_{Л.В.}$  відносно інерційного простору.

Вимірюючи за допомогою гіроскопічних пристроїв кутову швидкість поворота кординатора відносно інерційного простору[8], отримують з визначеним ступенем точності кутову швидкість лінії візування відносно інерціальної системи координат. Для пояснення сказаного розглянемо, наприклад, схему двовісного гіростабілізатора кординатора, зображену на рис.2.1.

Контури розгрузки гіростабілізаторів включають двигуни розгрузки Дв.р<sub>1</sub> Дв.р<sub>2</sub> і їх підсилувачі УР<sub>1</sub> і УР<sub>2</sub>. На платформі двовісного гіростабілізатора встановлений кординатор таким

чином, щоб його ОРЗ  $z_a$  співпадала із віссю стабілізації (в даній схемі стабілізуюча вісь – це вісь  $z$  гіроплатформи). Гіростабілізатор є кординатором на платформі встановлюють в ЛА таким чином, щоб мати можливість приймати випромінювання ОП [15, 21, 22].

Гіростабілізатор повинен забезпечувати відхилення осі  $z_a$  кординатора від поздовжньої осі  $x_1$  ЛА. Таке відхилення кординатора забезпечується поворотом в кардановому підвісі на кути (поворот платформи П з назовною рамкою навколо осі  $z_a$  рами) і (поворот платформи навколо її осі). На рис.2.1 через  $\alpha$  і  $\beta$  позначені відповідні цим поворотам кутові швидкості.

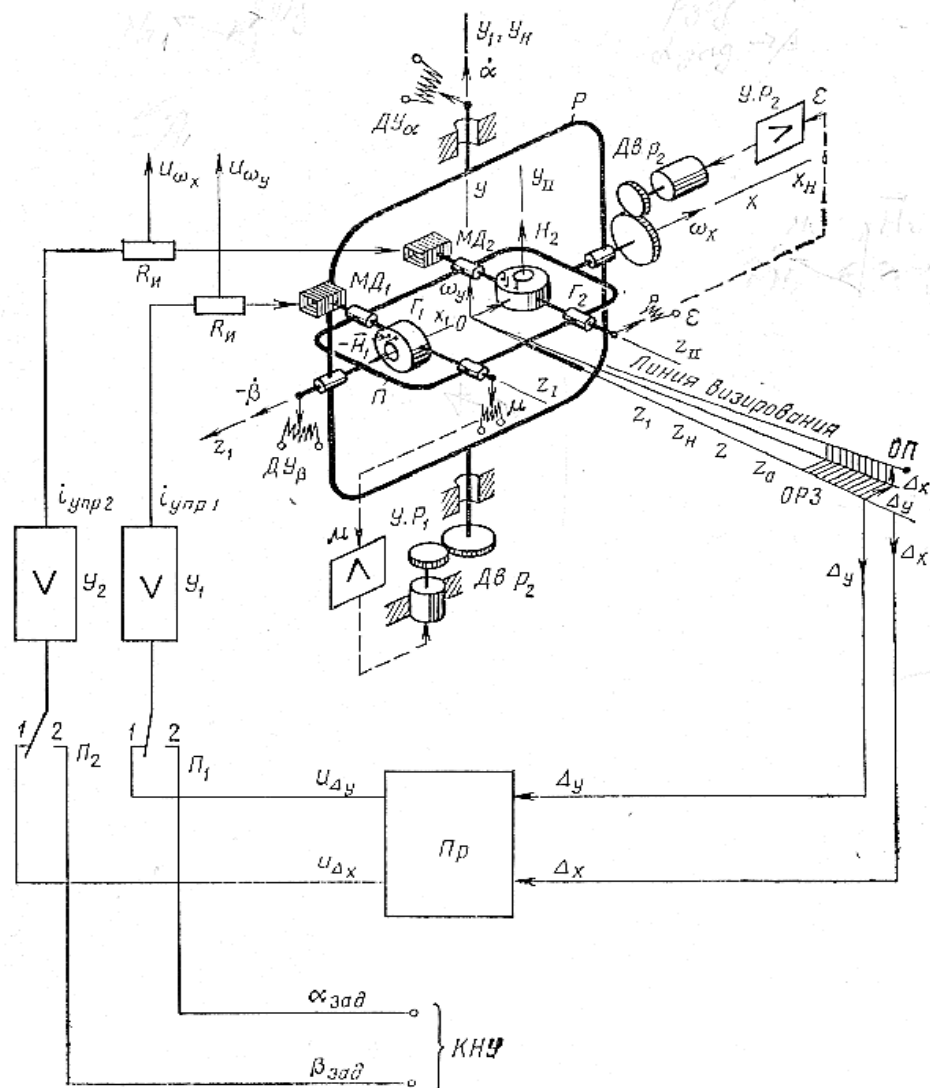


Рисунок 2.1 Функціональна схема дворотного двовісного гіростабілізатора

Груба установка ОРЗ кординатора в направленні на ОП здійснюється розворотом платформи П на кути  $\alpha_{\text{зад}}$  і  $\beta_{\text{зад}}$ . Перед початком автослідкування перемикачі П<sub>1</sub> і П<sub>2</sub> знаходяться в положенні 2. Команди початкової установки (КНУ), посилені підсилювачами У<sub>1</sub> і У<sub>2</sub>, поступають на моментні датчики МД<sub>1</sub> і МД<sub>2</sub> і примушують платформу прецесувати до тих пір, поки кути  $\alpha$  і  $\beta$ , взяті з датчиків кутів ДУ <sub>$\alpha$</sub>  і ДУ <sub>$\beta$</sub> , не стануть рівними заданим кутам  $\alpha_{\text{зад}}$  і  $\beta_{\text{зад}}$ .

При переході в режим автослідкування ОП перемикачі П<sub>1</sub> і П<sub>2</sub> підключають до входів підсилювачів керуючих моментних датчиків У<sub>1</sub> і У<sub>2</sub> сигнали від апаратури, виробляючий напругу  $u_{\Delta x}$  і  $u_{\Delta y}$ , пропорційну проєкціям кута розузгодження між направленням на ОП (лінією візування) і ОРЗ кординатора на площині, перпендикулярній осям  $x$  та  $y$  гіростабілізатора (відповідно). В такому випадку отримуємо замкнутий контур кутового автослідкування ОП, так як при руху ОП виникають розузгодження між лінією візування і ОРЗ [8, 15, 22]. Ці розузгодження перетворюються в перетворювачі П<sub>р</sub> в напругах  $u_{\Delta x}$  і  $u_{\Delta y}$ .

Чим більше розузгодження, тим більше керуючий струм  $i_{\text{упр1}}$  і  $i_{\text{упр2}}$ , проходячий через обмотки керуючих моментних датчиків МД<sub>1</sub> і МД<sub>2</sub>. При цьому моментні датчики розвивають момент, який визиває прецесію платформи у напрямку зменшення кутів розузгодження  $\Delta_x$  і  $\Delta_y$ .

Таким чином, кординатор встановлений на гіроплатформі, буде слідкувати за ОП при його русі відносно ЛА. Швидкість повороту гіроплатформи с кординатором:

$$\omega_{\text{упрх}} = \frac{M_{\text{упр2}}}{H_2}; \quad (2.1)$$

$$\omega_{\text{упру}} = \frac{M_{\text{упр1}}}{H_1}; \quad (2.2)$$

де  $M_{\text{упр1}}$  і  $M_{\text{упр2}}$  – керуючі моменти, розвинені моментними датчиками при проходженні по обмоткам керуючих струмів  $i_{\text{упр1}}$  і  $i_{\text{упр2}}$ , відповідно;  $H_1$  і  $H_2$  – кінетичні моменти гіроскопів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$ , встановлених на платформі П.

Вимірювання величини кутової швидкості лінії візування відтворюють по величині кутової швидкості поворота платформи с координатором в режимі

автослідкування за ОП. Для цього в ланцюг обмоток моментних датчиків можна встановити вимірювальний опір  $R_B$ . По величині напруги, падаючої на цих опорах, можна судити про величину струму в обмотках моментних датчиків ( $u_{\omega_x} = R_B i_{упр2}$ ,  $u_{\omega_y} = R_B i_{упр1}$ ).

Моментні магнітоелектричні датчики  $МД_1$  і  $МД_2$ , встановлені на осях прецесії гіроскопів, мають лінійну залежність між керуючим током і моментом ( $M_{упр} = K_{М,д} i_{упр}$ ). Кутову швидкість платформи можна виміряти по величині напруги, виділяючої на вимірювальних опорах  $R_B$ :

$$u_{\omega_x} = \omega_{упр x} \frac{H_2 R_B}{K_{М,д}}; \quad (2.3)$$

$$u_{\omega_y} = \omega_{упр y} \frac{H_1 R_B}{K_{М,д}}; \quad (2.4)$$

Формули (2.3) і (2.4) виведені в припущенні, показують, що кутова швидкість платформи повністю вираховується дією керуючого момента (2.1) і (2.2). В дійсності, кутова швидкість платформи складається із кутової швидкості прецесії під дією керуючого струму в обмотці моментного датчика ( $\omega_{упр x}$  і  $\omega_{упр y}$ ), власної швидкості прецесії (дрейфа) гіростабілізатора під дією збурюючих моментів, діючих навколо осей прецесії ( $\omega_x^*$  і  $\omega_y^*$ ) від впливу збурюючих моментів, діючих навколо осей стабілізації. Складові  $\tilde{\omega}_x$  та  $\tilde{\omega}_y$  кутової швидкості платформи вираховуються якістю стабілізації платформи, тобто величинами залишкових коливань гіроплатформи, викликаних коливаннями ЛА [15, 21-23].

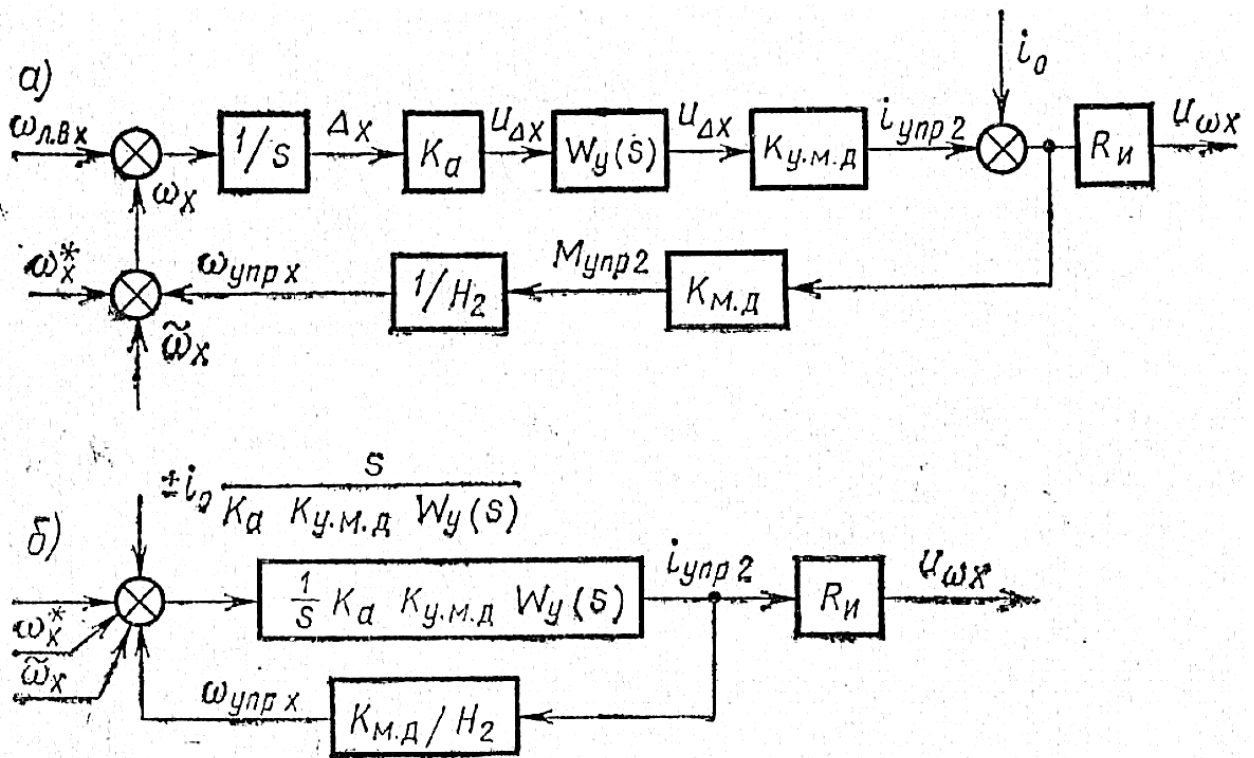


Рисунок 2.2 Структурна схема вимірювання кутової швидкості лінії  
візування

Таким чином, кутова швидкість платформи  $\omega_x = \omega_{упрx} \pm \omega_x^* + \tilde{\omega}_x$ ;  $\omega_y = \omega_{упрy} \pm \omega_y^* + \tilde{\omega}_y$ .

Виходячи з цього, уточнимо вимоги до гіростабілізатора як вимірювача кутової швидкості лінії візування. На рис.2.2а, зображена структурна схема вимірювання проекції кутової швидкості лінії візування на вісь  $x$  гіроплатформи. В схемі врахований нульовий сигнал  $i_0$  посилюючих пристроїв і апаратури виділення напруги  $u_{\Delta x}$  чи  $u_{\Delta y}$ , діючий на виході підсилювача моментного датчика [16, 17]. В схемі прийняті наступні позначення (крім згаданих вище):  $\omega_{ЛВx}$  – проекція кутової швидкості повороту лінії візування на вісь  $x$  гіроплатформи;  $K_\alpha = \frac{u_{\Delta x}}{\Delta x}$  – коефіцієнт передачі апаратури, вироблючої напруги  $u_{\Delta x}$  чи  $u_{\Delta y}$ ;  $K_{у.м.д} = \frac{i_{упр2}}{u_{\Delta x}}$  – коефіцієнт підсилення підсилювача моментного датчика  $U_2$ ;  $W_y(s)$  – передатна функція контура керування (з урахуванням усіх ланцюгів);  $K_{м.д} = \frac{M_{упр2}}{i_{упр2}}$  – коефіцієнт передачі моментного датчика.

На рис.2.2б, приведена перетворена схема 2.2,а, з якої не складно отримати напругу, взяту з вимірювального опору в режимі автослідкування

$$u_{\omega x} = \frac{R_H H_2}{K_{M,д}} * \frac{W_y(s)}{T_y s + W_y(s)} (\omega_{Л.ВХ} \pm \omega_x^* + \tilde{\omega}_x \pm i_0 \frac{s}{[K_\alpha K_{y,м.д} W_y(s)]}), \quad (2.5)$$

де  $\frac{1}{T_y} = d_y = \frac{K_\alpha K_{M,д} K_{y,м.д}}{H_2} = \frac{\omega_{упр x}}{\Delta_x}$  – добротність контура кутового автослідкування, тобто швидкість гіроплатформи  $\omega_{упр x}$  ( $\frac{\text{град}}{\text{сек}}$ ) при вхідному сигналі  $\Delta_x = 1$  град.

Аналогічно можна отримати:

$$u_{\omega y} = \frac{R_B H_1 W_y(s)}{K_{M,д} [T_y s + W_y(s)]} (\omega_{Л.ВУ} \pm \omega_y^* + \tilde{\omega}_y \pm i_0 \frac{s}{[K_\alpha K_{y,м.д} W_y(s)]}) \quad (2.6)$$

Як видно із отриманих формул, напруга  $u_{\omega_x}$  і  $u_{\omega_y}$  пропорційні кутовим швидкостям лінії візування  $\omega_{Л.ВХ}$  і  $\omega_{Л.ВУ}$ . Стабільність величини  $\frac{R_B H}{K_{M,д}}$  залежить від стабільності опору  $R_B$  і кінетичного моменту  $H$ , а також лінійності і стабільності залежності моменту від струму моментного датчика ( $K_{M,д}$ ).

Погрішність вимірювання кутової швидкості лінії візування залежить і від нульового сигналу  $i_0$  в контурі автослідкування. При цьому погрішність пропорційна не величині нульового сигналу, а швидкості  $i_0 s$  зміни нульового сигналу. Величина цієї погрішності, приведена в помилці вимірювання кутової швидкості лінії візування, буде

$$\frac{i_0 s}{[K_\alpha K_{y,м.д} W_y(s)]} \quad (2.7)$$

Якщо величину нульового струму виразити через швидкість гіроплатформи, відповідно цього нульового струму:  $\omega_i = \frac{i_0 K_{M,д}}{H}$ , то цю погрішність можна записати

так:

$$\frac{\omega_i}{[d_y W_y(s)]} \quad (2.8)$$

Із (2.8) бачимо, що ця погрішність пропорційна похідній від  $\omega_i$ .

Погрішність вимірювання кутової швидкості лінії візування вираховується також велочиною власної швидкості прецесії гіростабілізатора  $\omega^*$  і якістю стабілізації гіроплатформи при русі основи (ЛА).

Як видно з рівнянь (2.5) та (2.6), гіростабілізатор вимірює сумарну кутову швидкість  $\omega_{Л.В} + \omega^* + \tilde{\omega}$ , при чому складові  $\omega^*$  і  $\tilde{\omega}$  вираховують погрішність вимірювання гіростабілізатором кутової швидкості лінії візування.

Таким чином, недивлячись на специфіку використання гіростабілізаторів с координаторами, є ряд вимог, дуже близьких до тих, які представляються до гіростабілізаторів, використовуваних у навігаційних системах. Так, в розібраній вище схемі на рис.2.1 двовісний гіростабілізатор застосовується в режимі, аналогічному застосуванню гіростабілізаторів в якості гіровертикалей.

В гіровертикалях корегуючі сигнали від маятників суміщають вісь  $z$  з вертикаллю, а в розглянутому випадку корегуючі сигнали  $u_{\Delta x}$  і  $u_{\Delta y}$  суміщають вісь  $z$  з лінією візування. Вимоги до мінімальної власної кутової швидкості прецесії (дрейфу) представляються в обох випадках [12, 17, 19].

## 2.2 Огляд варіантів схем стабілізаторів

Як було показано вище, ряд основних функцій гіростабілізаторів кординаторів схожі с функціями гіростабілізаторів, використовуваних в якості гіровертикалей. Виходячи з цього для гіростабілізаторів кординаторів можуть бути прийняті доволі численні варіанти схем двовісних чи тривісних гіровертикалей.

Нижче розглядаються деякі із варіантів двовісних гіростабілізаторів для випадків їх використання в якості гіростабілізаторів кординаторів [19, 28, 29].

## Схема двовісного двороторного гіростабілізатора осі прецесії гіроскопів якого паралельні осі z стабілізації

Для аналізу роботи цього стабілізатора, принципова схема якого зображена на рис.2.1, а також інших систем двовісних гіростабілізаторів приймемо системи координат (праві) і умовні позначення, які приводяться нижче:  $x_1 y_1 z_1$  – зв’язані з ЛА так, що вісь  $x_1$  співпадає з поздовжньою віссю ЛА;  $x y z$  – зв’язані з платформою П так, що в нульовому положенні вісь  $z$  співпадає з віссю  $x_1$ , вісь  $x$  співпадає з від’ємним напрямком вісі  $z_1$ , вісь  $y$  співпадає з віссю  $y_1$ ;  $x_n y_n z_n$  – зв’язані з наружною рамою гіростабілізатора так, що вісь  $y_n$  співпадає з віссю поворота наружної рами, вісь  $x_n$  співпадає з віссю  $x$  платформи;  $x_1 y_1 z_1$  та  $x_n y_n z_n$  – зв’язані з кожухами гіроскопів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  відповідно;  $\alpha, \beta$  – кути повороту наружної рами відносно ЛА і платформи навколо внутрішньої вісі відносно наружної рами відповідно;  $\mu, \varepsilon$  – кути поворота гіроскопів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  відповідно навколо осей прецесії відповідно платформи П;  $\omega_{x_1} \omega_{y_1} \omega_{z_1}$  – кутові швидкості поворота корпусу ЛА навколо осей  $x_1, y_1, z_1$  відповідно;  $\omega_x \omega_y \omega_z$  – кутові швидкості поворота платформи навколо осей  $x, y, z$  відповідно;  $H_1, H_2$  – кінетичні моменти гіроскопів  $\Gamma_1, \Gamma_2$  відповідно;  $A_1, B_1, C_1$  – моменти інерції платформи з гіроскопами відносно осей  $x, y, z$  відповідно;  $A_2, B_2, C_2$  – моменти інерції наружної рами карданового підвісу відносно осей  $x_1 y_1 z_1$  відповідно;  $A_3, A_4$  – моменти інерції гіроскопів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  (відповідно) відносно осей прецесії;  $J_\alpha, J_\beta$  – приведені до осей стабілізації моменти інерції роторів двигунів розвантаження;  $D_\alpha, D_\beta$  – придильні моменти демпфування, приведені до відповідних осей стабілізації;  $k_d$  – крутизна диференціюючого гіроскопа ( відношення кута прецесії до кутової швидкості в статиці);  $M_{y_1 \text{ вн}}, M_{x \text{ вн}}$  – зовнішні моменти, діючі на платформу;  $M_{y_1 \text{ р}}(\mu), M_{x \text{ р}}(\varepsilon)$  – розвантажувальні моменти у функції кутів  $\mu$  та  $\varepsilon$ ;  $M_{\mu \text{ упр}}, M_{\varepsilon \text{ упр}}$  – керуючі моменти, виникаючі навколо осей прецесії моментними датчиками МД<sub>1</sub> і МД<sub>2</sub>;  $M_{\mu \text{ в}}, M_{\varepsilon \text{ в}}$  – моменти збурення, діючі навколо осей прецесії і викликаючи «дрейф» гіростабілізатора.

Використовуючи приведені умовні позначення, лінеризовані рівняння гіростабілізатора по схемі на рис.2.1 можна записати в наступному вигляді:

а) рух гіроплатформи навколо осей стабілізатора  $y_H, x$ :

$$\begin{aligned} & \frac{(A_2 + J_\alpha + B_1 \cos^2 \beta_0 + C_1 \sin^2 \beta_0) \omega_y}{\cos \beta_0} + \frac{D_\alpha \omega_y}{\cos \beta_0} + H_1 \dot{\mu} \cos \beta_0 + M_{y1p}(\mu) = \\ & = -(A_2 + J_\alpha + C_1) (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \dot{\alpha}_0 \operatorname{tg} \beta_0 + J_\alpha \omega_{y1} - \\ & - D_\alpha (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \operatorname{tg} \beta_0 + D_\alpha \omega_{y1} + M_{y1BH} - \\ & - H_1 (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0); \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & (A_1 + J_\beta) \dot{\omega} + D_\beta \omega_x - H_2 \dot{\varepsilon} + M_{xp}(\varepsilon) = J_\beta (-\dot{\omega}_{x1} \sin \alpha_0 - \dot{\omega}_{z1} \cos \alpha_0) + \\ & + D_\beta ((\omega_{x1} \sin \alpha_0 - \omega_{z1} \cos \alpha_0) \dot{\alpha}_0) + M_{xBH} + \frac{H_2 ((\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \dot{\alpha}_0)}{\cos \beta_0}; \end{aligned} \quad (2.10)$$

б) рух гіроскопів навколо їх осей прецесії

$$\begin{aligned} & A_3 (\ddot{\mu} + \dot{\omega}_z) - H_1 \omega_y - H_1 \mu \omega_x + D_\mu \dot{\mu} + k_d \mu = M_{\mu ypp} + M_{\mu B}; \\ & A_4 (\ddot{\varepsilon} + \dot{\omega}_z) + H_2 \omega_x + H_2 \varepsilon \omega_y + D_\varepsilon \dot{\varepsilon} + k_d \varepsilon = M_{\varepsilon ypp} + M_{\varepsilon B}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

Моменти  $k_d \mu$  і  $k_d \varepsilon$  мають місце, якщо гіростабілізатор побудований на базі диференціюючих гіроскопів.

Кутові швидкості

$$\begin{aligned} & \omega_z = \omega_y \operatorname{tg} \beta_0 + \omega_{x1} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \beta_0} + \omega_{z1} \frac{\sin \alpha_0}{\sin \beta_0}; \\ & \dot{\alpha} = -\omega_{y1} \frac{\omega_y}{\cos \beta_0} + \omega_{x1} \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \beta_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0 \operatorname{tg} \beta_0; \\ & \dot{\beta} = -\omega_x - \omega_{x1} \sin \alpha_0 - \omega_{z1} \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Лінеаризація проведена для випадків невеликих відхилень гіроплатформи від рівноваженого стану, котре характеризується наступними постійними значеннями

змінних:  $\alpha = \alpha_0$ . Керуючі моменти  $M_{\mu\text{упр}}$  і  $M_{\varepsilon\text{упр}}$  в (2.11) в режимі автослідкування формуються як функції кутів розузгодження між ОРЗ і лінією візирування ОП, тобто функції кутів  $\Delta_y$  і  $\Delta_x$ :

$$M_{\mu\text{упр}} = F_{\text{упр}}(s)\Delta_y, M_{\varepsilon\text{упр}} = F_{\text{упр}}(s)\Delta_x; \quad (2.13a)$$

Формуються контури управління, тобто знаходять функцію  $F_{\text{упр}}(s)$  в процесі розрахунку гіростабілізатора, виходячи з потребуваної динаміки контура автослідкування ОП (добротності контура, степені фільтрації «шумів» та ін.).

В правій частині рівняння руху (2.9) є складова моменту збурення, пропорційна моменту інерції платформи  $C_1$ . Ця складова інерційного збурюючого моменту характерна для всіх двовісних гіростабілізаторів незалежно від кількості і розташування гіроскопів на платформі. Цим двовісний підвіс відрізняється від тривісного, в якому величина інерційного збурюючого моменту не залежить від моменту інерції платформи. Для даної кінематичної схеми характерні збурення, пропорційні кінематичним моментам  $H_1$  і  $H_2$  ( в правій частині). Ці збурення необхідно враховувати при силовій стабілізації гіроплатформи. При індикаторній стабілізації платформи на гіроскопах з малими кінетичними моментами цими збуреннями можна знехтувати.

Із (2.11) кутові швидкості платформи будуть:

$$\begin{aligned} -\omega_y &= \frac{M_{\mu\text{упр}}}{H_1} + \frac{M_{\mu\text{в}}}{H_1} + \mu\omega_x - \frac{D_\mu \dot{\mu}}{H_1} - \frac{k_d}{H_1} - \frac{A_3 \ddot{\mu}}{H_1} + \frac{A_3 \dot{\omega}_z}{H_1}; \\ -\omega_x &= \frac{M_{\varepsilon\text{упр}}}{H_2} + \frac{M_{\varepsilon\text{в}}}{H_2} + \varepsilon\omega_y - \frac{D_\varepsilon \dot{\varepsilon}}{H_2} - \frac{k_d \varepsilon}{H_2} - \frac{A_4 \ddot{\varepsilon}}{H_2} + \frac{A_4 \dot{\omega}_z}{H_2} \end{aligned} \quad (2.13б)$$

Якщо вимірювання кутової швидкості платформи с координатором ведеться, як і було сказано вище, шляхом вимірювання величини керуючих моментів  $M_{\mu\text{упр}}$  і  $M_{\varepsilon\text{упр}}$  ( по величині керуючих струмів  $i_{\text{упр}1}$  та  $i_{\text{упр}2}$ ), то в (2.13б) всі складові кутових швидкостей  $\omega_y$  і  $\omega_x$ , окрім першої, являються погрішностями вимірювання

кутової швидкості гіроплатформи, а значить і лінії візування. Ці погрішності в (2.5) и (2.6) позначені через  $(\omega_x^* + \tilde{\omega}_x)$  і  $(\omega_y^* + \tilde{\omega}_y)$  відповідно. Змінна складова власної швидкості прецесії  $\tilde{\omega}_x$  і  $\tilde{\omega}_y$  вираховується останніми чотирма членами рівняння (2.13б). Змінна складова містить кутову швидкість пропорційну  $\omega_z$ , тобто переносному руху гіроплатформи навколо стабілізованої осі  $z'$ . Наявність цієї складової характерно саме для розглянутої кінематичної схеми гіростабілізатора на рис.2.1. Інші члени змінної складової залежать від величини моментів збурення, діючих навколо осей стабілізації, і від якості контура розвантаження, тобто від параметрів, впливаючих на рух гіровузлів навколо осей прецесії  $\mu$  та  $\varepsilon$ .

Постійна складова власної швидкості прецесії  $(\omega_x^*$  і  $\omega_y^*)$  вираховується, в основному, величинами збурюючих моментів навколо осей прецесії  $M_{\mu zб}$  і  $M_{\varepsilon zб}$ . Ці моменти визивають погрішності  $\omega_{By}^* = \frac{M_{\mu zб}}{H_1}$  і  $\omega_{Bx}^* = \frac{M_{\mu zб}}{H_2}$ . Збурючі моменти  $M_{\mu zб}$  і  $M_{\varepsilon zб}$  мають складові, залежні від величини лінійних прискорень, діючих на гіроскоп. Тому ці величини  $\omega_{By}^*$ ,  $\omega_{Bx}^*$ , вираховують виходячи з складових  $\omega_0^*$ ,  $\omega_1^*$ ,  $\omega_2^*$ . При гармонічних коливаннях ЛА і викликаючих ними гармонічних коливаннях платформи виникає додаткова постійна складова особистої швидкості прецесії гіроплатформи навколо осей  $x$  та  $y$ , викликана некомутативністю кінцевих обертів тіла в просторі [10, 16, 29]. Ця погрішність аналогічна погрішності  $\omega_k^*$  для одновісних гіростабілізаторів. При гармонічних коливаннях ЛА зі швидкістю  $\omega_{x1}$ , амплітудне значення якого позначимо через  $\omega_{x1}^\circ$  і синхронних коливаннях платформи навколо осей  $y$  і  $x$  з амплітудами кутів відповідно  $\Omega_x^\circ$  і  $\Omega_y^\circ$  і при коливаннях гіроскопів з амплітудами  $\tilde{\mu}'$  і  $\tilde{\varepsilon}'$  виникає постійна складова швидкості прецесії:

$$\begin{aligned}\omega_{ky}^{*'} &= \frac{1}{2} \frac{\cos\alpha_0}{\cos\beta_0} \omega_{x1}^\circ \Omega_x^\circ \sin(\omega_{x1}, \Omega_x^\circ) + \frac{1}{2} \omega_x^\circ \tilde{\mu}' \sin(\omega_x, \tilde{\mu}'); \\ \omega_{kx}^{*'} &= \frac{1}{2} \frac{\cos\alpha_0}{\cos\beta_0} \omega_{x1}^\circ \Omega_x^\circ \sin(\omega_{x1}, \Omega_y^\circ) + \frac{1}{2} \omega_y^\circ \tilde{\varepsilon}' \sin(\omega_x, \tilde{\varepsilon}');\end{aligned}\quad (2.14)$$

Аналогічно, при гармонічних коливаннях ЛА вокруг поперечної  $z_1$  вісі з

амплітудним значенням швидкості  $\omega_{z1}^{\circ}$  і при синхронних цим коливанням рухам гіростабілізатора з амплітудами  $\Omega_x^{\circ''}$ ,  $\omega_x^{\circ''}$ ,  $\Omega_y^{\circ''}$ ,  $\tilde{\mu}^{\circ''}$ ,  $\tilde{\varepsilon}^{\circ''}$  виникає особиста швидкість прецесії платформи:

$$\begin{aligned}\omega_{ky}^{*''} &= \frac{1}{2} \frac{\cos\alpha_0}{\cos\beta_0} \omega_{x1}^{\circ} \Omega_x^{\circ''} \sin(\omega_{z1}, \Omega_x'') + \frac{1}{2} \omega_x^{\circ''} \tilde{\mu}^{\circ''} \sin(\omega_x, \tilde{\mu}''); \\ \omega_{kx}^{*''} &= \frac{1}{2} \frac{\cos\alpha_0}{\cos\beta_0} \omega_{z1}^{\circ} \Omega_y^{\circ''} \sin(\omega_{z1}, \Omega_y'') + \frac{1}{2} \omega_y^{\circ''} \tilde{\varepsilon}^{\circ''} \sin(\omega_y, \tilde{\varepsilon}'');\end{aligned}\quad (2.15)$$

Значення параметрів, в (2.14) і (2.15), можна вираховувати методами автоматичного регулювання.

Якщо гіроплатформу стабілізують за допомогою диференціюючих гіроскопів, а контур стабілізації сформований так, що при діх статичних моментів навколо осей стабілізації виникає статична помилка по відповідним кутам прецесії  $\mu_0$  і  $\varepsilon_0$ , то з'являється постійна складова швидкості прецесії:

$$\omega_{ст y}^* = \frac{k_d \mu_0}{H_1}, \quad \omega_{ст x}^* = \frac{k_d \varepsilon_0}{H_2}; \quad (2.16)$$

Таким чином, можна записати:

$$\begin{aligned}\omega_y^* &= \omega_{by}^* + (\omega_{ky}^{*'} + \omega_{ky}^{*''}) + \omega_{ст y}^*; \\ \omega_x^* &= \omega_{bx}^* + (\omega_{kx}^{*'} + \omega_{kx}^{*''}) + \omega_{ст x}^*;\end{aligned}\quad (2.17)$$

Специфічні погрішності для даної кінематичної схеми являються погрішностями виду  $\mu_{\omega x}$  і  $\varepsilon_{\omega x}$  в (2.13б). Ці погрішності призводять до взаємозв'язку каналів керування гіростабілізатора в контурі автослідкування і до відносно невеликої масштабної похибки вимірювання кутової швидкості  $\omega_{л. в}$ , так як в цій схемі вимірювання кутової швидкості лінії візування  $\omega_{л. в}$ , ведуть по суті, не в ортогональних осях гіроплатформи  $x$  і  $y$ , а в системі координат  $y_1$  і  $x_b$ , створеної осями чутливих гіроскопів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$ .

### Схема двовісного двороторного гіростабілізатора, осі роторів гіроскопів якого паралельні осі стабілізації

Принципова схема гіростабілізатора зображена на рис.2.3. Функціонування цього гіростабілізатора аналогічно функціонуванню гіростабілізатора, показаного на рис 2.1, яке було описано вище.

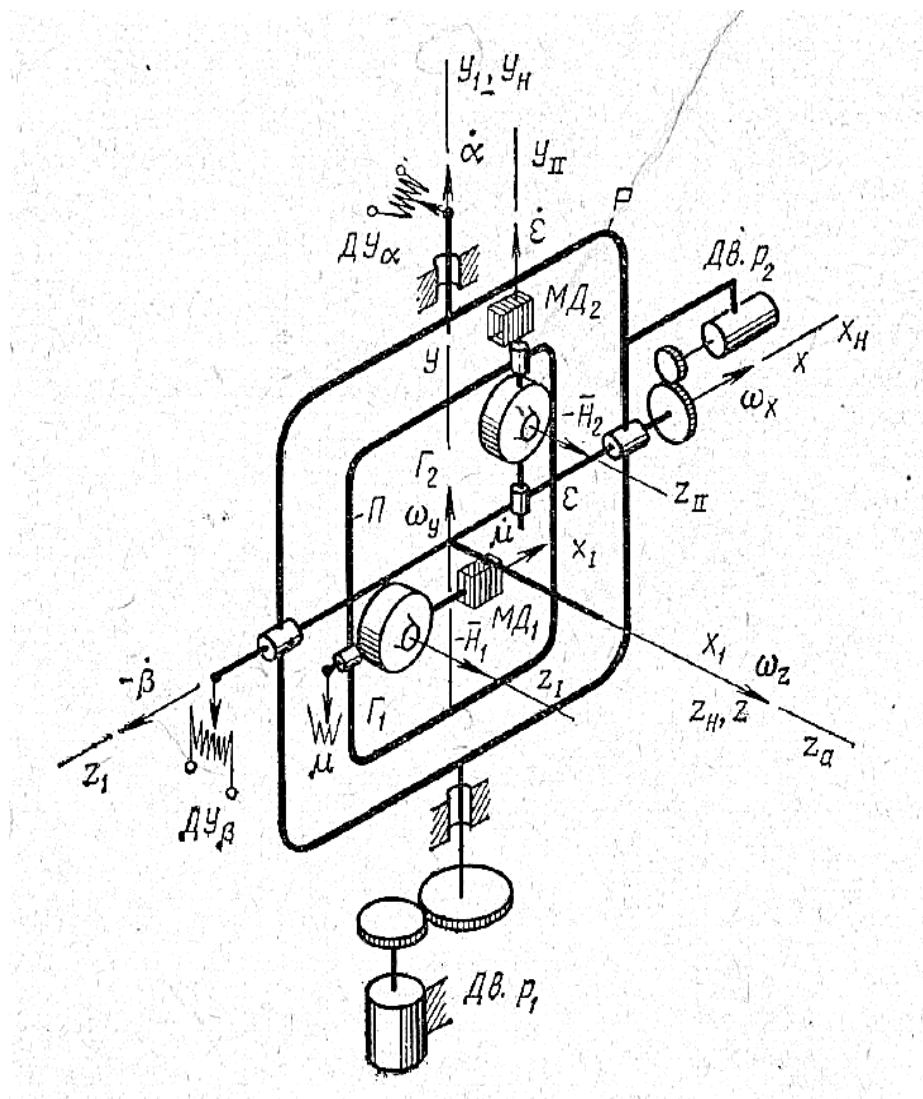


Рисунок 2.3 Кінематична схема двороторного гіростабілізатора, осі роторів гіроскопів якого паралельні осі  $z$  стабілізації

Лінеаризовані рівняння руху такого гіростабілізатора відносно осей стабілізації  $y_H$  і  $x$  відрізняються від рівнянь (2.9) та (2.10) тільки тим, що в них відсутні збурюючі моменти від переносного руху гіроплатформи навколо осі  $z$ ,

тобто  $-H_1 (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0)$  – в рівнянні (2.9) і  $H_2 \frac{1}{\cos \beta_0} (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0)$  – в рівнянні (2.10). Кутові швидкості  $\omega_z, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$  вираховуються рівняннями (2.12). В рівняннях, вираховуючих кутові швидкості платформи  $\omega_y$  і  $\omega_x$ , в порівнянні з рівняннями (3.13б) відсутні члени, а є додаткові члени виду  $\mu \omega_z$  (в рівнянні, виокремлюючому  $\omega_y$ ) і  $\varepsilon \omega_z$  (в рівнянні для  $\omega_x$ ). Виходячи із рівнянь руху, змінні кутових швидкостей  $\omega_y$  і  $\omega_x$  для гіростабілізатора по схемі рис.2.3 мають вид:

$$\begin{aligned}\tilde{\omega}_y &= \mu_0 \omega_z + \frac{D_\mu \dot{\mu}}{H_1} + \frac{A_3 \ddot{\mu}}{H_1} + \frac{k_d \tilde{\mu}}{H_1}; \\ \tilde{\omega}_x &= -\varepsilon_0 \omega_z + \frac{D_\varepsilon \dot{\varepsilon}}{H_2} + \frac{A_3 \ddot{\varepsilon}}{H_2} + \frac{k_d \tilde{\varepsilon}}{H_2};\end{aligned}\quad (2.18)$$

де  $\mu_0, \varepsilon_0$  – постійні складові кутів  $\mu$  і  $\varepsilon$ ;  $\tilde{\mu}, \tilde{\varepsilon}$  - періодичні складові кутів  $\tilde{\mu}$  і  $\tilde{\varepsilon}$ .

Погрішності вида  $\mu_0 \omega_z$  і  $\varepsilon_0 \omega_z$  являються специфічними для даної схеми гіростабілізатора. В силових гіростабілізаторах, де кути  $\mu_0$  і  $\varepsilon_0$  мають порівняно більші значення (порядка 5), ці погрішності можуть бути домінуючими. Якщо в цих складових погрішностей кутову швидкість  $\omega_z$  замінити через кутові швидкості руху ЛА (2.12), то отримаємо формули для вираховання відношення амплітуди коливання гіроплатформи до амплітуди коливань основи:

$$\begin{aligned}\frac{\tilde{\omega}_y}{\omega_{x1}} &= \frac{\mu_0 \cos \alpha_0}{\cos \beta_0}, \quad \frac{\tilde{\omega}_y}{\omega_{z1}} = \frac{-\mu_0 \sin \alpha_0}{\cos \beta_0}; \\ \frac{\tilde{\omega}_x}{\omega_{x1}} &= \frac{\varepsilon_0 \cos \alpha_0}{\cos \beta_0}, \quad \frac{\tilde{\omega}_x}{\omega_{z1}} = \frac{-\varepsilon_0 \sin \alpha_0}{\cos \beta_0};\end{aligned}\quad (2.19)$$

Постійні складові власної швидкості прецесії  $\omega_x$  і  $\omega_y$  виокремлені формулами (2.17). Наявні в цих формулах складові, визвані некомутативністю кінцевих обертів тіла, визначаються наступними співвідношеннями (умовні позначення аналогічні прийнятим для (2.14) і (2.15):

$$\begin{aligned}
\omega_{\text{кy}}^{*'} &= \frac{1}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \beta_0} \widehat{\omega_{x1}^{\circ} \mu^{\circ'}} \sin(\widehat{\omega_{x1} \tilde{\mu}'}); \\
\omega_{\text{кx}}^{*'} &= \frac{1}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \beta_0} \widehat{\omega_{x1}^{\circ} \varepsilon^{\circ'}} \sin(\widehat{\omega_{x1} \tilde{\varepsilon}'}); \\
\omega_{\text{кy}}^{*''} &= \frac{1}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \beta_0} \widehat{\omega_{z1}^{\circ} \mu^{\circ''}} \sin(\widehat{\omega_{z1} \tilde{\mu}''}); \\
\omega_{\text{кx}}^{*''} &= \frac{1}{2} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \beta_0} \widehat{\omega_{z1}^{\circ} \varepsilon^{\circ''}} \sin(\widehat{\omega_{z1} \tilde{\varepsilon}''}).
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Момент, що створюється струмопідводом, пропорційний куту повороту рами карданового підвісу та при правильному виборі матеріалу та конструкції провідників є відносно невеликим. Абсолютне значення моменту визначається за емпіричними формулами в залежності від матеріалу дроту, кількості та довжини провідників.

Моменти сил тертя визначаються тертям в струмопідводах та датчиках кута контактного типу (за наявності), тертям безпосередньо в опорах карданова підвісу та моментами сил тертя в двигунах розвантаження, які приводяться до осей карданова підвісу.

Під час кутового руху об'єкта, на якому встановлений гіростабілізатор, відносно осей рам карданова підвісу, виникають моменти сил інерції внаслідок обкатки ротора двигуна розвантаження з редуктором відносно рами гіростабілізатора. Для уникнення впливу даного моменту бажано використовувати безредукторні двигуни розвантаження, які, в такому випадку, мають суттєву перевагу внаслідок відсутності моменту обкатки.

При кутових рухах основи внаслідок особливостей кінематики карданова підвісу зовнішня та внутрішня рами гіростабілізатора обертаються навколо осі стабілізації з різними кутовими швидкостями. В такому випадку, при періодичних кутових коливаннях об'єкта, на якому встановлений ГС, виникатиме момент сили інерції, що може досягати значних величин. Особливо це стосується гіростабілізаторів непрямої дії, в яких компенсація цього моменту сил інерції має

повністю забезпечуватись системою розвантаження.

У перехідних режимах польоту об'єкта, на якому встановлюється гіростабілізатор, можуть виникати значні за амплітудою лінійні прискорення, які, в свою чергу, створюють значний момент сили інерції при незбалансованості елементів конструкції гіростабілізатора. Цей момент за величиною порівняний з моментами сил тертя.

Враховуючи складність кінематики та динаміки систем гіроскопічної стабілізації, проблема синтезу алгоритмів таких систем доволі складна та може розглядатись з різних позицій. Багато уваги при створенні таких систем автоматичного керування приділяється оптимальним системам, тобто таким системам, що мають найкращі характеристики за певним критерієм. Як критерій оптимальності розглядають, як правило, мінімум визначеного функціоналу від величин, що характеризують стан системи. Таким чином можуть бути отримані системи, наприклад, оптимальні з точки зору швидкодії (мінімальний час переходу системи з одного стану до іншого) або оптимальні з точки зору витрат енергії (мінімум потужності, що споживає система керування) та ін.

Проблема оптимального керування полягає в синтезі оптимальної структури системи керування або оптимальному виборі параметрів системи при відомій структурі [3].

Прикладом розв'язку задачі синтезу оптимальної структури системи керування може бути визначення передатної функції системи, яка забезпечує мінімум середнього квадратичного відхилення похибки системи при дії на вході корисного сигналу та шуму, що розглядаються як стохастичні функції. Задача вибору параметрів системи при відомій структурі більш спеціалізована та зводиться до знаходження мінімуму певної функції, наприклад визначення часткових похідних по параметрах та прирівнянням їх до нуля. Проте, спроба побудови оптимальної системи, наприклад за швидкодією, виключно математичними методами може привести до такого результату, що буде неприйнятним за іншими показниками – надійності, маси, габаритів, енергоспоживання в т.д.

Використання гіростабілізаторів непрямої дії дозволяє створювати високоточні системи стабілізації кутових положень, що особливо важливо при використанні гіростабілізованих платформ з оптичними та навігаційними приладами. В таких системах гіроскопічної стабілізації можуть використовуватись малогабаритні гіроскопи. Зменшення габаритів системи в цілому також дозволяє мінімізувати вплив деяких шкідливих моментів та, відповідно, підвищити точність гіростабілізатора.

### **Висновки до 2 розділу**

Другий розділ включає в себе опис технічної частини конструкції гіростабілізатора, особливості під час роботи та відмінності в установленні його на платформу чи інший пристрій - тобто сам процес роботи та підготовка.

Було обрано математичну модель системи стабілізації, яка включає модель стабілізованої платформи з гіроскопами, які використовуються для визначення кутової швидкості відхилення платформи від положення рівноваги. Проведено її детальний аналіз та скориговано відповідно до завдання на розробку системи стабілізації. Проведено розрахунок інерційних характеристик навантаження, з урахуванням корисного навантаження.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВОВІСНОГО ГІРОСТАБІЛІЗАТОРА

#### 3.1 Моделювання роботи гіростабілізатора за динамічними рівняннями

Для моделювання використовуються рівняння отримані з системи рівнянь руху гіроплатформи навколо осей стабілізатора  $y_H, x$  (2.9), (2.10), та рівнянь руху гіроскопів навколо їх осей прецесії (2.11):

$$\begin{aligned} & \frac{(A_2 + J_\alpha + B_1 \cos^2 \beta_0 + C_1 \sin^2 \beta_0) \omega_y}{\cos \beta_0} + \frac{D_\alpha \omega_y}{\cos \beta_0} + H_1 \dot{\mu} \cos \beta_0 + M_{y1p}(\mu) = \\ & = -(A_2 + J_\alpha + C_1) (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \dot{\alpha}_0 \operatorname{tg} \beta_0 + J_\alpha \omega_{y1} - \\ & \quad - D_\alpha (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \operatorname{tg} \beta_0 + D_\alpha \omega_{y1} + M_{y1BH} - \\ & \quad - H_1 (\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0); \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & (A_1 + J_\beta) \dot{\omega} + D_\beta \omega_x - H_2 \dot{\varepsilon} + M_{xp}(\varepsilon) = J_\beta (-\dot{\omega}_{x1} \sin \alpha_0 - \dot{\omega}_{z1} \cos \alpha_0) + \\ & + D_\beta ((\omega_{x1} \sin \alpha_0 - \omega_{z1} \cos \alpha_0) \dot{\alpha}_0) + M_{xBH} + \frac{H_2 ((\omega_{x1} \cos \alpha_0 - \omega_{z1} \sin \alpha_0) \dot{\alpha}_0)}{\cos \beta_0}; \end{aligned} \quad (2.10)$$

рух гіроскопів навколо їх осей прецесії:

$$\begin{aligned} & A_3 (\ddot{\mu} + \dot{\omega}_z) - H_1 \omega_y - H_1 \mu \omega_x + D_\mu \dot{\mu} + k_d \mu = M_{\mu ypp} + M_{\mu B}; \\ & A_4 (\ddot{\varepsilon} + \dot{\omega}_z) + H_2 \omega_x + H_2 \varepsilon \omega_y + D_\varepsilon \dot{\varepsilon} + k_d \varepsilon = M_{\varepsilon ypp} + M_{\varepsilon B}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

В першому наближенні будемо вважати кути повороту платформи малими величинами, відтак, лінеаризуємо гармонічні функції їх першими членами розкладання в ряд Тейлора. Також будемо нехтувати складовими другого порядку малості, які визначають перехресні зв'язки в системі гіростабілізатора.

Для моделювання використаємо систему MATLAB, яка дозволяє отримати чисельний розв'язок системи звичайних диференціальних рівнянь за допомогою,

наприклад вбудованих функцій типу ode45, ode23 та подібних. В даних функціях використовуються методи Рунге-Кутти зі змінюваним кроком інтегрування, тому, при їх використанні можна зменшити час на отримання результату. Для використання функції ode45 необхідно привести систему рівнянь гіростабілізатора до форми простору станів. В результаті ми отримуємо шість змінних стану, які характеризують кутовий рух платформи та гіроскопів на ній. Нижче наводиться текст програми моделювання:

На рис. 3.1 - 3.3 наведено результати моделювання вільного руху платформи відносно осі Y при початковому відхиленні 0.001 рад, а на рис. 3.4 - 3.6 результати моделювання при заданому вхідному моменті амплітудою 0.01 Нм і частотою 10 1/с.

На рис. 3.7 - 3.9 наведено результати моделювання вільного руху платформи відносно осі Y при початковому відхиленні 0.001 рад, а на рис. 3.10 - 3.12 результати моделювання при заданому вхідному моменті амплітудою 0.01 Нм і частотою 10 1/с.

Як видно з результатів моделювання власні частоти обох каналів керування приблизно однакові. Для аналізу вимушеного руху слід побудувати додатково частотні характеристики гіростабілізатора.

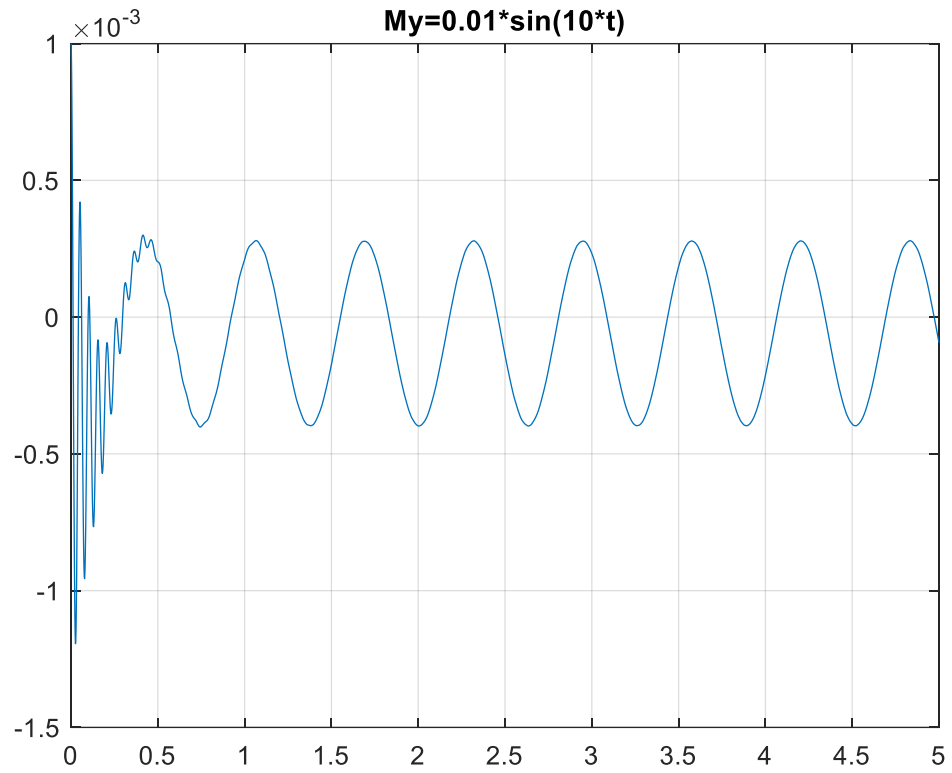


Рисунок 3.1 Кутова швидкість платформи

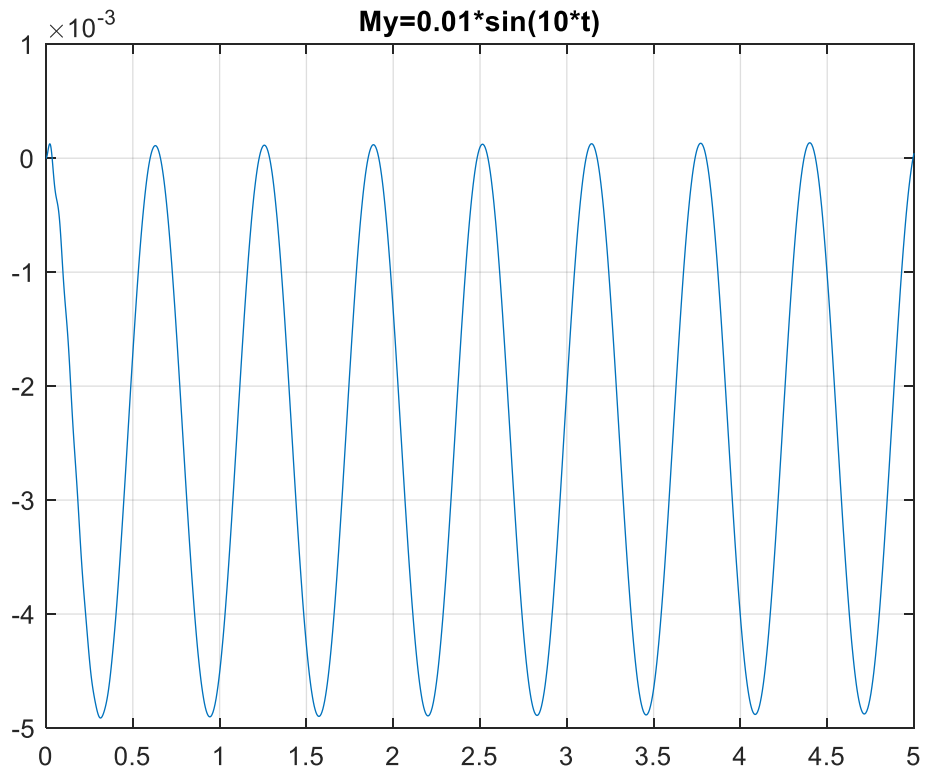


Рисунок 3.2 Кут повороту гіроскопа

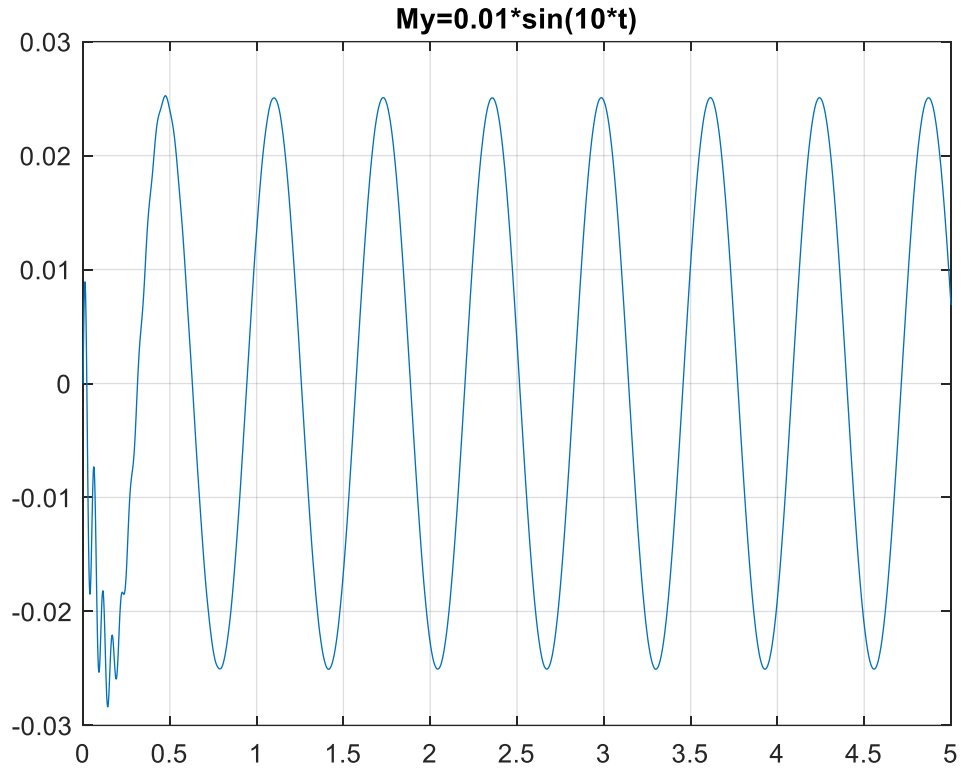


Рисунок 3.3 Кутова швидкість повороту гіроскопа

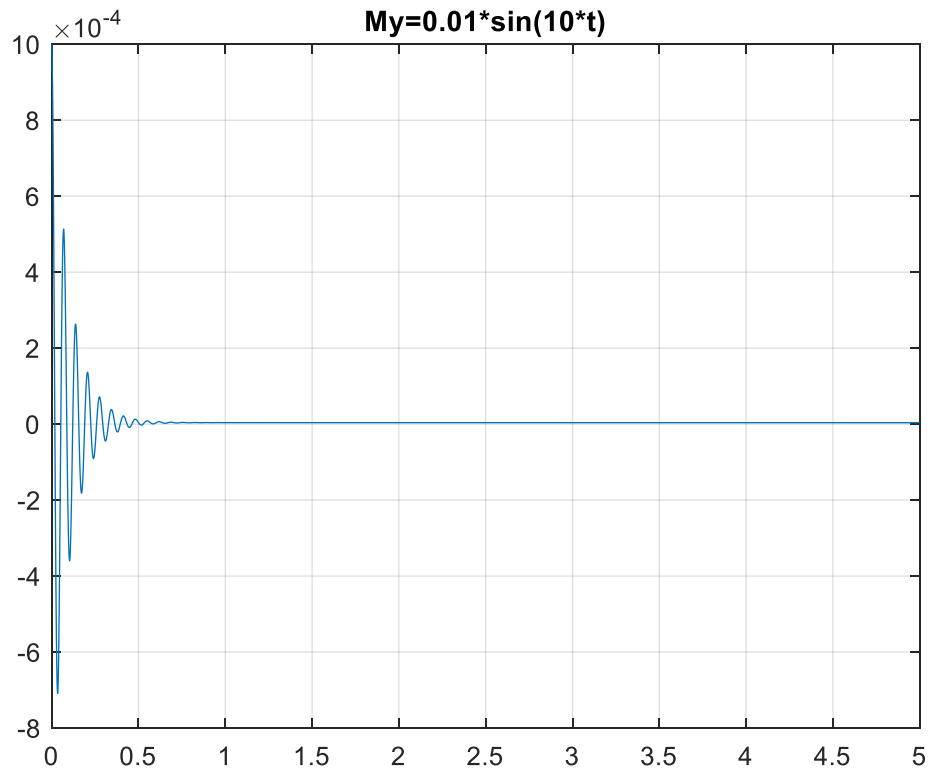


Рисунок 3.4 Кутова швидкість платформи

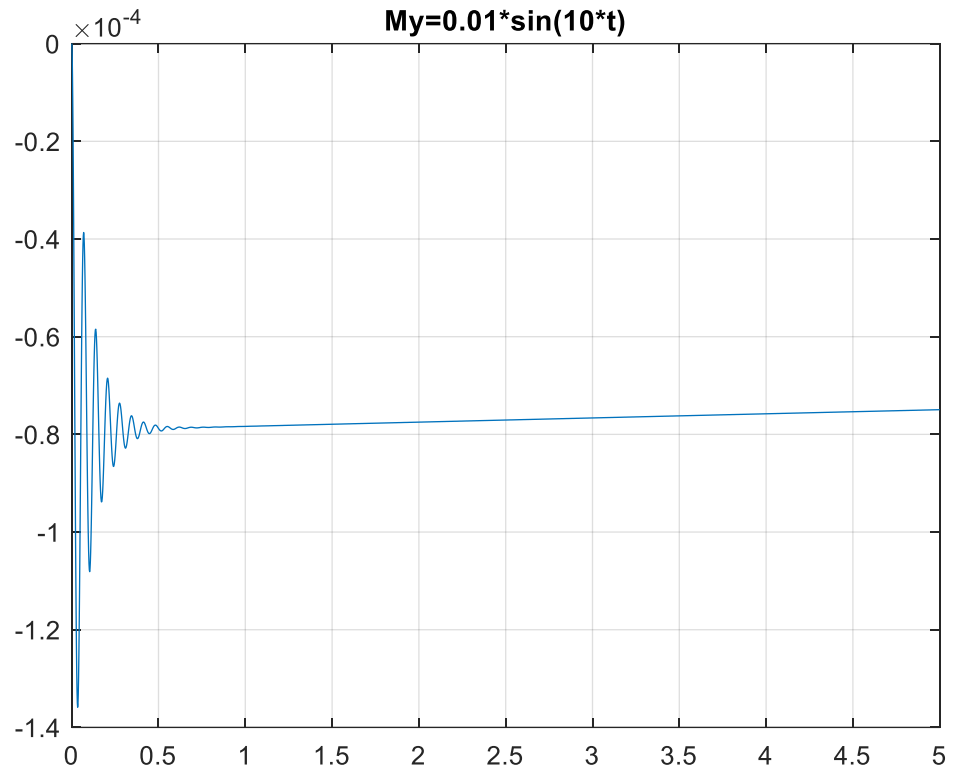


Рисунок 3.5 Кут повороту гіроскопа

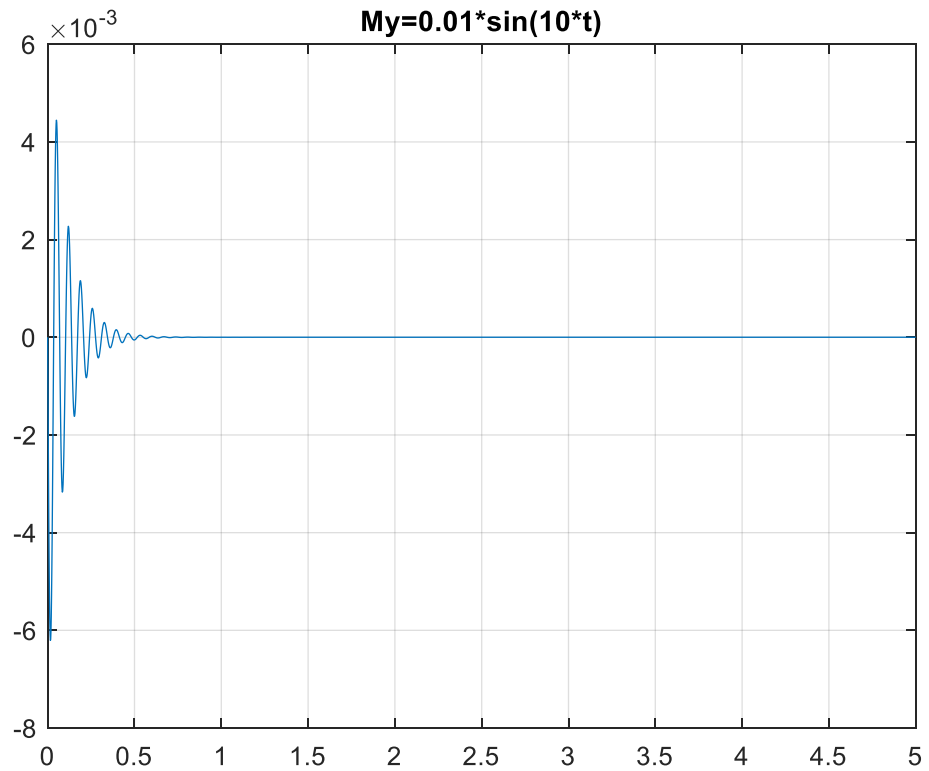


Рисунок 3.6 Кутова швидкість повороту гіроскопа

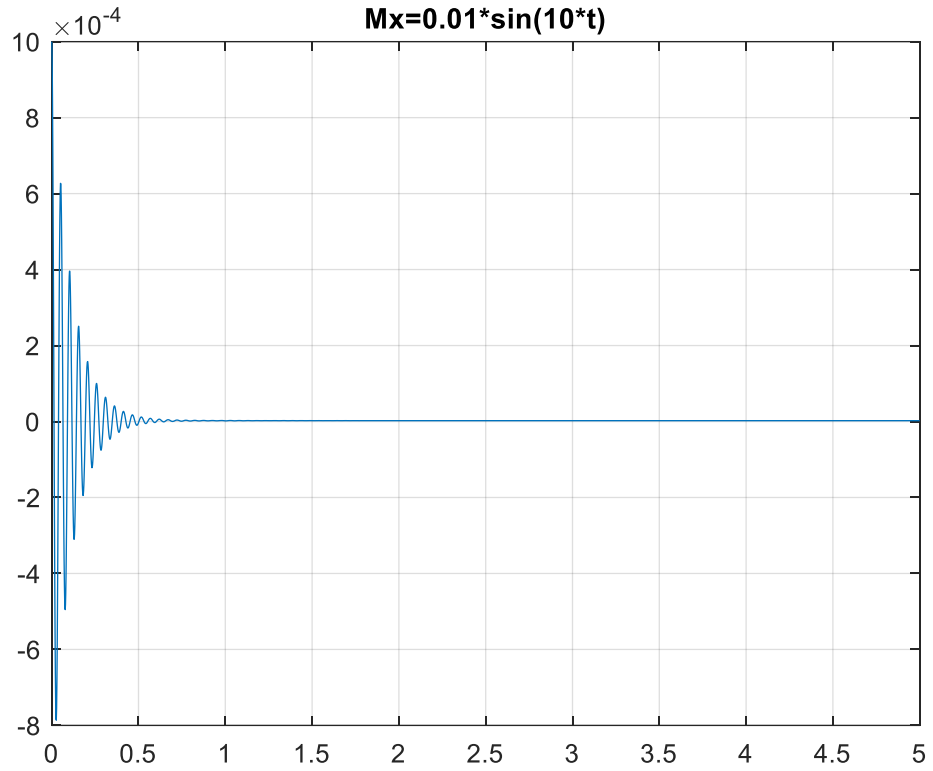


Рисунок 3.7 Кутова швидкість платформи

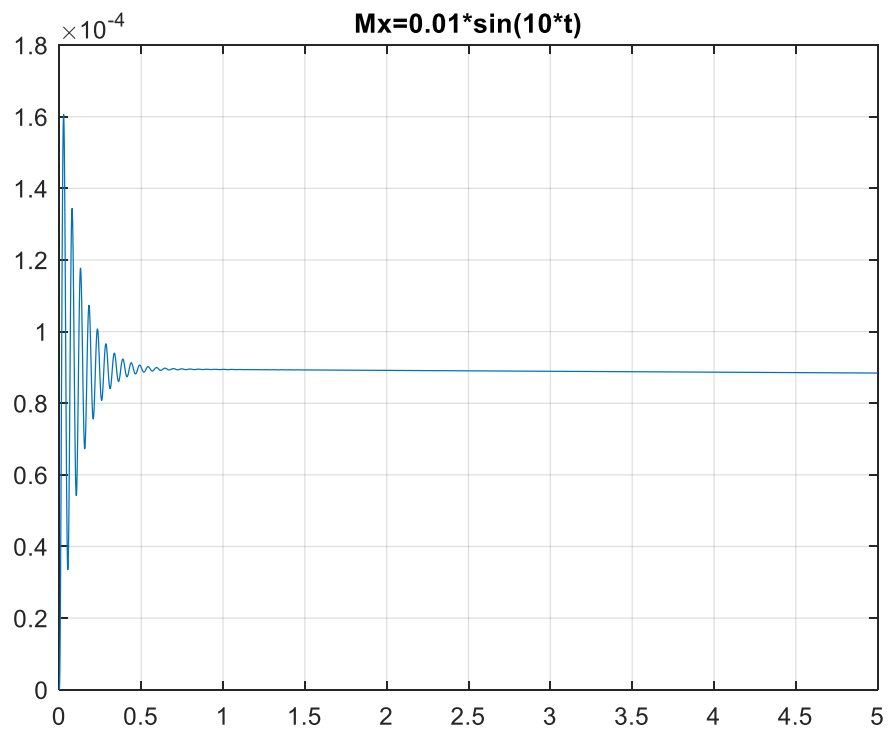


Рисунок 3.8 Кут повороту гіроскопа

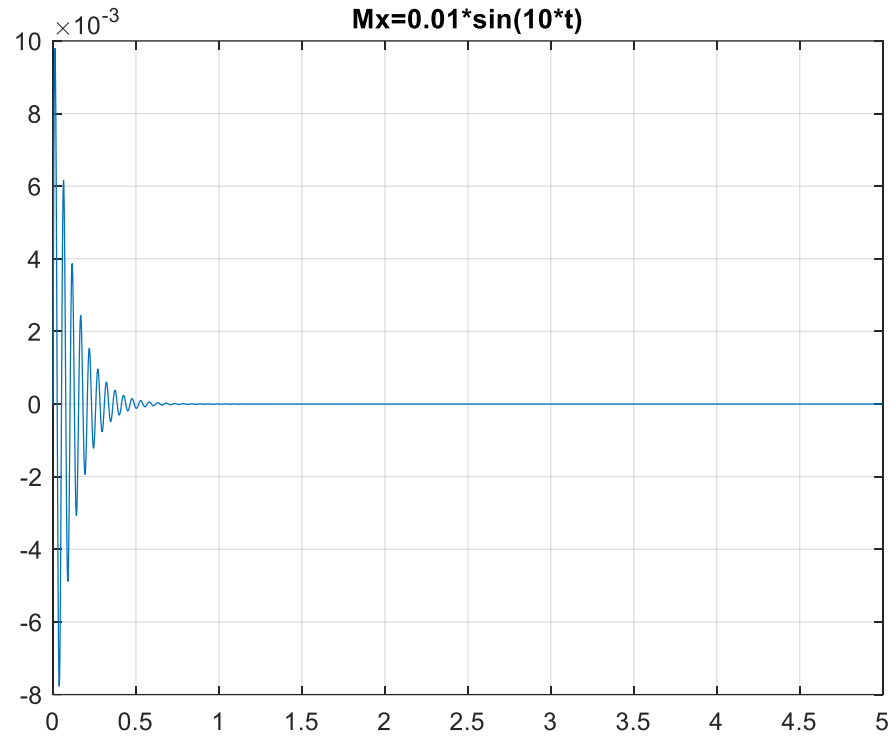


Рисунок 3.9 Кутова швидкість повороту гіроскопа

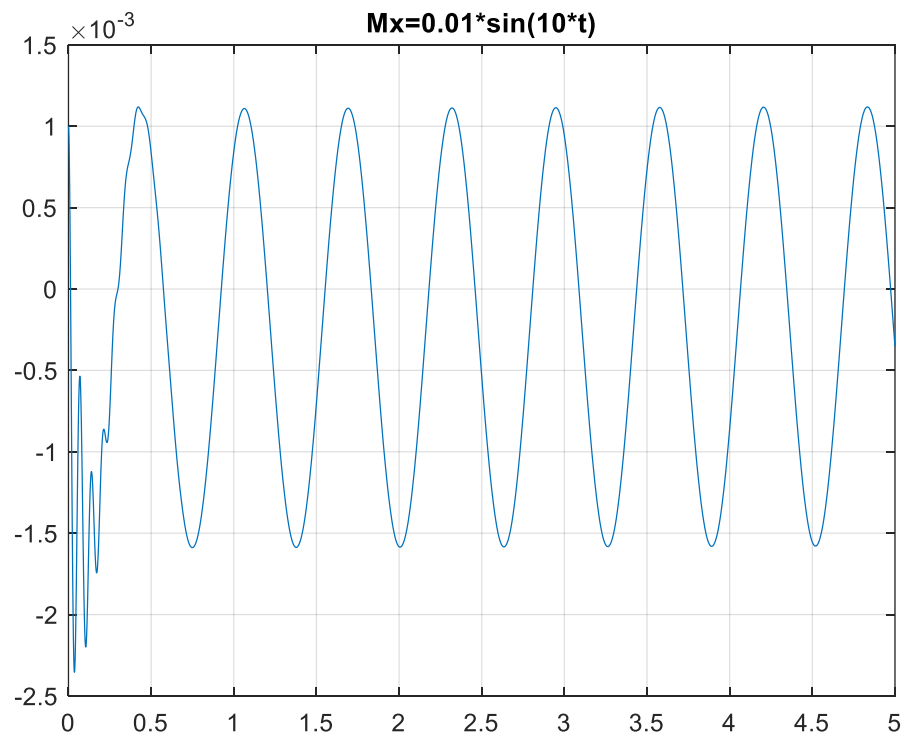


Рисунок 3.10 Кутова швидкість платформи

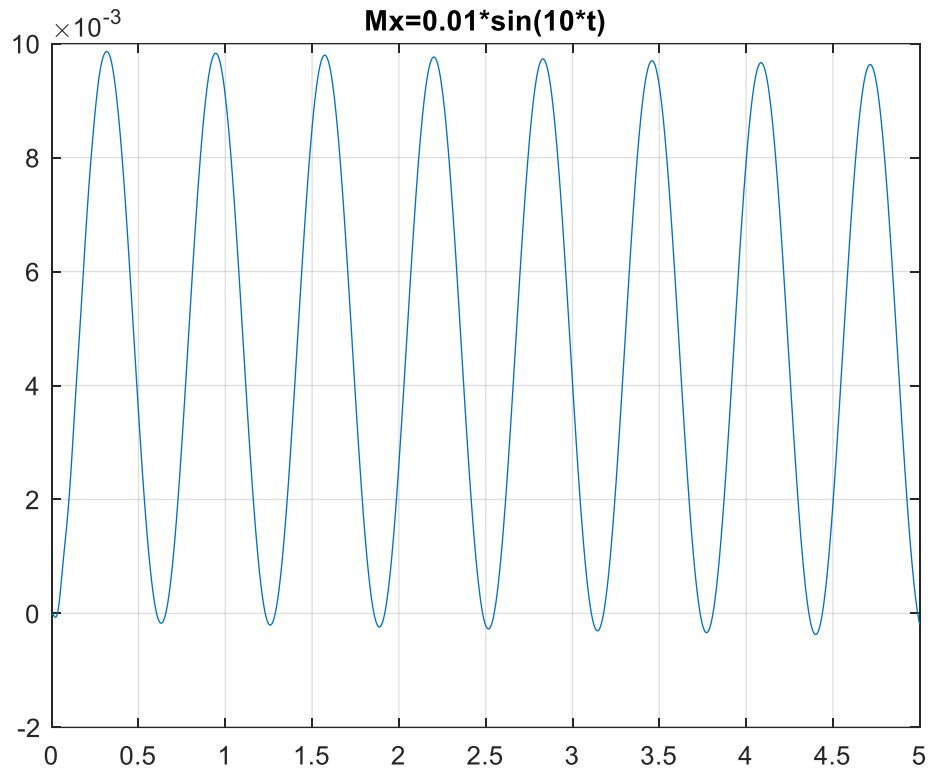


Рисунок 3.11 Кут повороту гіроскопа

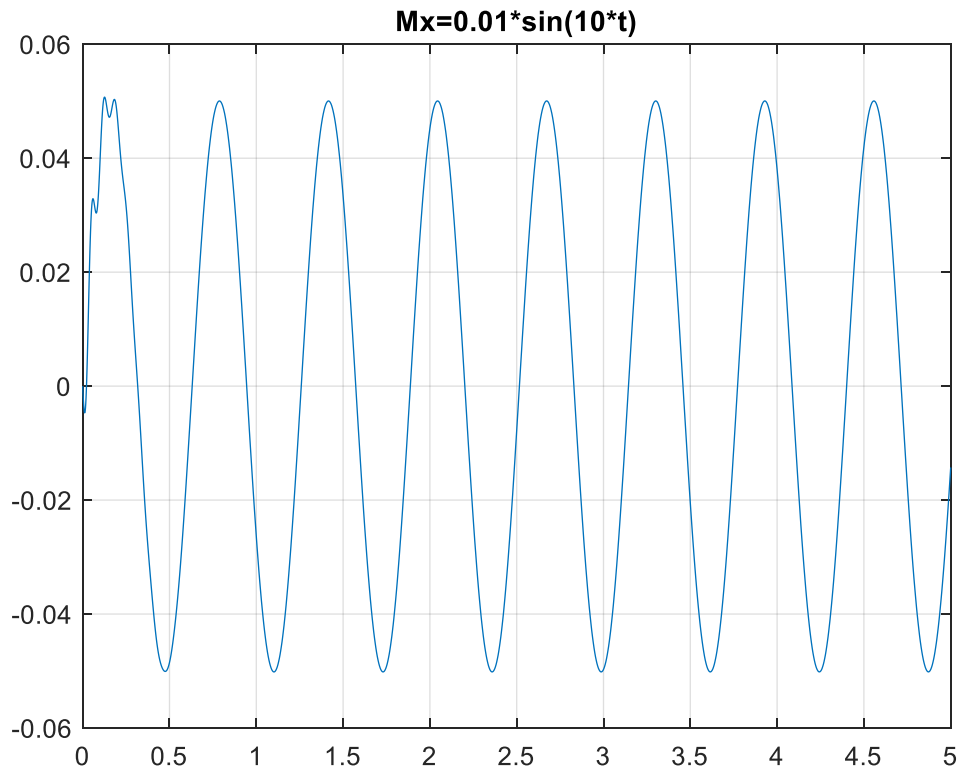


Рисунок 3.12 Кутова швидкість повороту гіроскопа

### 3.2 Розрахунок контура стабілізації гіроплатформи навколо зовнішньої осі

Структурна схема контурів стабілізації і керування навколо зовнішньої осі гіростабілізатора  $y_H$  представлена на рис.3.13. Схема складена на основі рівнянь руху гіростабілізатора (2.9) – (2.11). Для моделювання будемо використовувати середовище Simulink.

Розглядаючи схему можна зробити висновок, що відмінність схеми одновісного в порівнянні з двовісним полягає у залежності параметрів гіростабілізатора від кута повороту  $\beta$  гіроплатформи навколо внутрішньої осі гіростабілізатора. Цей зв'язок каналів стабілізації навколо зовнішньої і внутрішньої осі гіростабілізатора досить ефективний і її слід враховувати, розрахувавши контур стабілізації для двох значень кутів:  $\beta_0 = 0$  і  $\beta_0 = \beta_{max}$ .

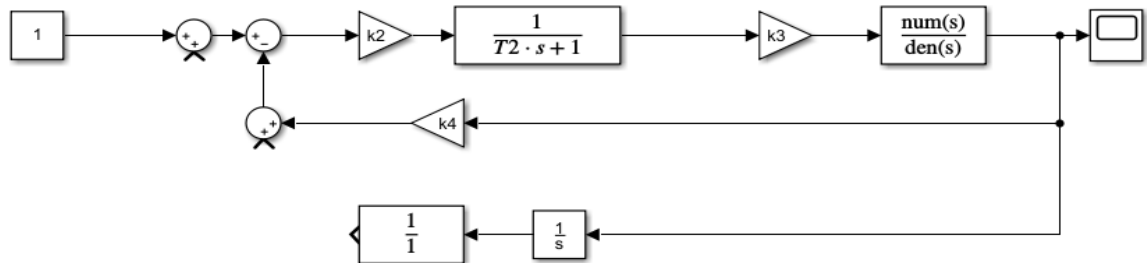


Рисунок 3.13 Структурна схема контурів стабілізації і керування навколо зовнішньої осі двовісного силового гіростабілізатора

Графік, який наведений на рис.3.14 відповідає попереднім результатам досліджень які проводились на основі системи диференціальних рівнянь (2.11).

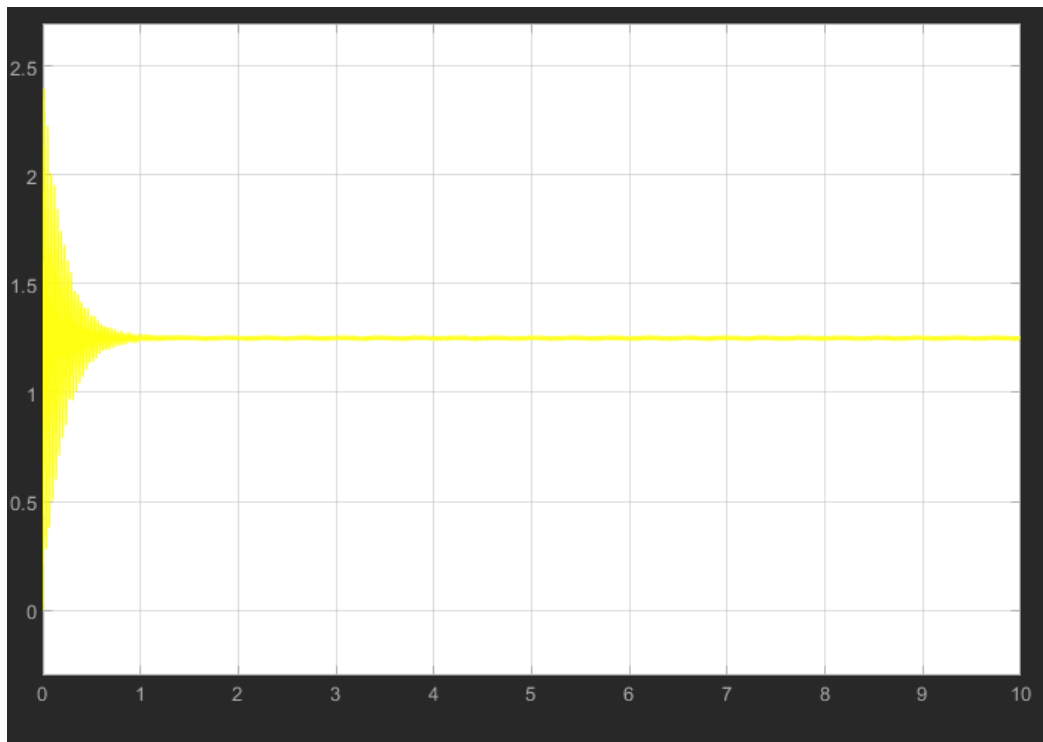


Рисунок 3.14 Результати моделювання контуру стабілізації зовнішньої осі

Контур стабілізації можна розраховувати при розімкнутому контурі керування (приймавши  $[F_{\text{упр}}(s) = 0]$ , тому що зазвичай цей контур має невисоку добротність і при правильному його формуванні являє незначний вплив на стійкість контура стабілізації.

Передатна функція контуру:

$$M_{\text{упр}}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{\text{к.упр}}} + 1\right)^2} = \frac{1}{(T_{\text{упр}}(s) + 1)^2} \quad (??)$$

$$\text{Де } T_{\text{упр}} = \frac{1}{\omega_{\text{к.упр}}}, \omega_{\text{к.упр}} = 0.6, \omega_{\text{н.мін}} = 100\text{с}^{-1}, T_{\text{упр}} = 0.01\text{с}$$

При роботі гіростабілізатора контур управління виконується за схемою, що наведена на рис.3.13. Вхідною величиною, що подається до контуру управління є кутова швидкість відхилення ЛВ відносно осі  $u$ .

На рис.3.15 наведено результати моделювання роботи гіростабілізатора з контуром керування. На графіку жовтим кольором позначено вихідну величину (кутову швидкість  $\omega_{\text{упр}}$ ), а синім - вхідний сигнал гіростабілізатора.

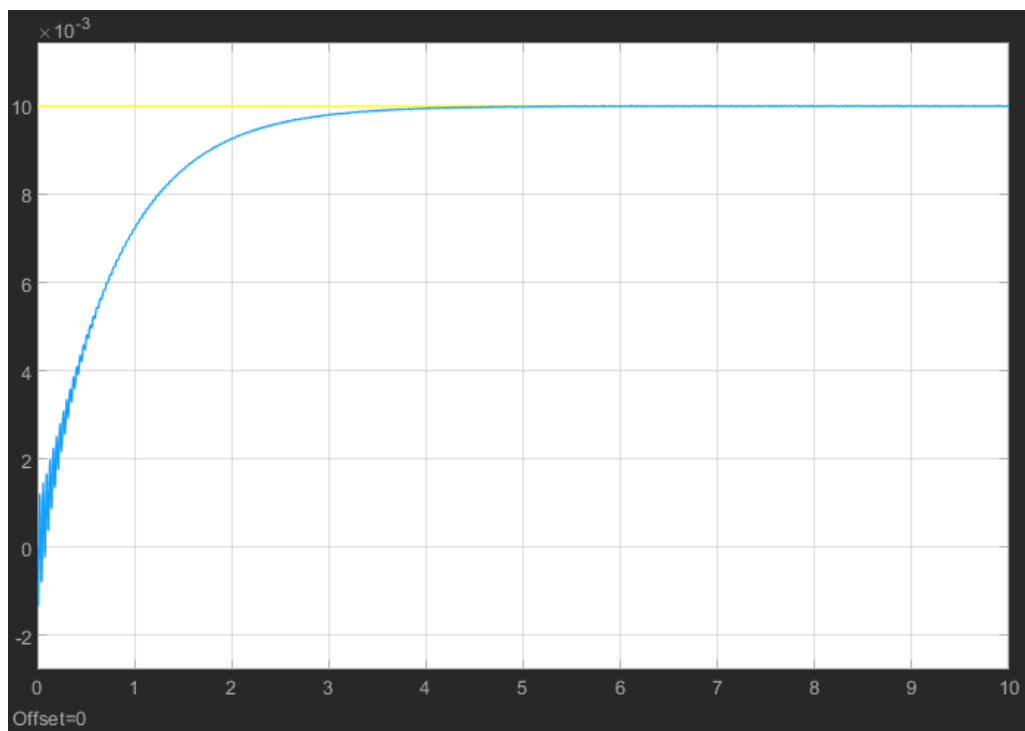


Рисунок 3.15 Графік вихідної швидкості гіростабілізатора з контуром керування

Також кутова швидкість  $\omega_{упр}$  може змінюватись за гармонічним законом. В такому випадку вихідний сигнал буде синусоїдальним, з такою ж самою частотою. На рис.3.16 показано вхідний і вихідний сигнали при  $\omega_{упр}=0.01 \sin \omega * t$ , де  $\omega = 1 \text{ c}^{-1}$ .

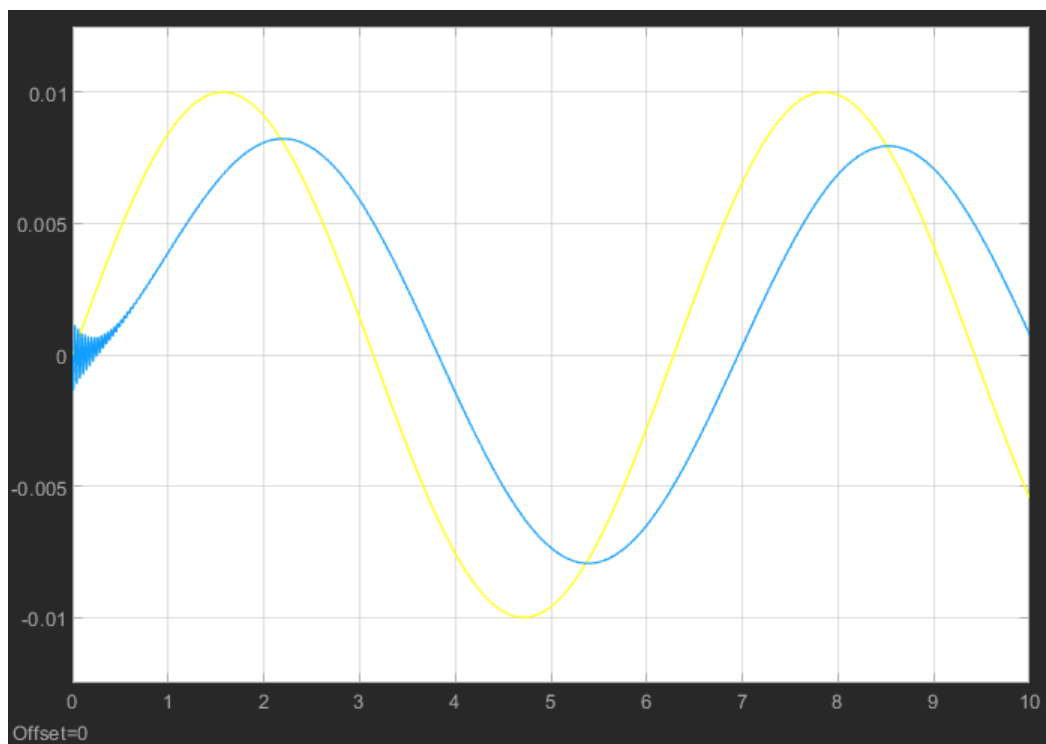


Рисунок 3.16 Графік вхідного (жовтий) та вихідного (синій) сигналу ГС

Як видно з наведеного графіка, вихідний сигнал має похибку по амплітуді 15-20% , а також фазовий зсув приблизно  $45^\circ$ .

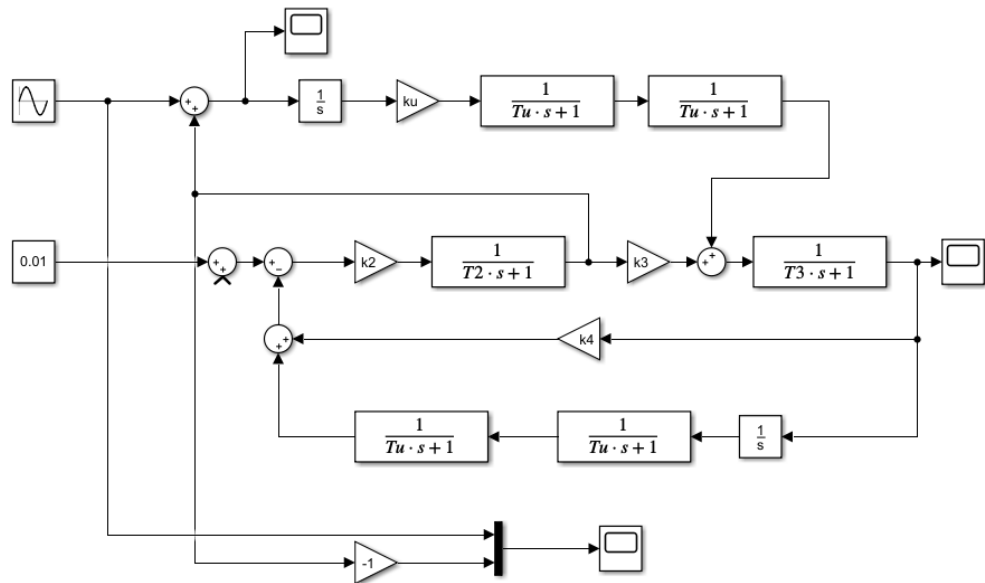


Рисунок 3.17 Структурна схема системи з контуром керування

### 3.3 Аналіз частотних характеристик гіростабілізатора

Рівняння руху зовнішньої осі гіростабілізатора можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} I_y \ddot{\omega}_y + D_y \dot{\omega}_y + H_1 \mu = M_y \\ A_y \ddot{\mu} - H_1 \dot{\omega}_y + D_\mu \dot{\mu} + k\mu = M_z \end{cases}$$

Для визначення передатних функцій представимо рівняння в операторній формі:

$$\begin{cases} I_y p \omega_y(p) + D_y \omega_y(p) + H_1 p \mu(p) = M_y(p) \\ A_y p^2 \mu(p) - H_1 \omega_y(p) + D_\mu p \mu(p) + k \mu(p) = M_z(p) \end{cases}$$

Характеристичний поліном розімкненої системи:

$$\Delta(p) = (I_y p + D_y)(A_y p^2 + D_\mu p + k) + H_1^2 p = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \text{ де}$$

$$\begin{aligned}
 a_3 &= I_y A_y \\
 a_2 &= D_y A_y + I_y D_\mu \\
 a_1 &= I_y k + H_1^2 + D_\mu D_y \\
 a_0 &= D_y k
 \end{aligned}$$

Передатна функція:

$$W(p) = \frac{\omega_y(p)}{M_y(p)} = \frac{A_y p^2 + D_\mu p + k}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

Побудовані частотні характеристики для передатної функції зображено на рис.3.17. Для побудови частотних характеристик використовується засоби Simulink, зокрема пакет Linear Analysis.

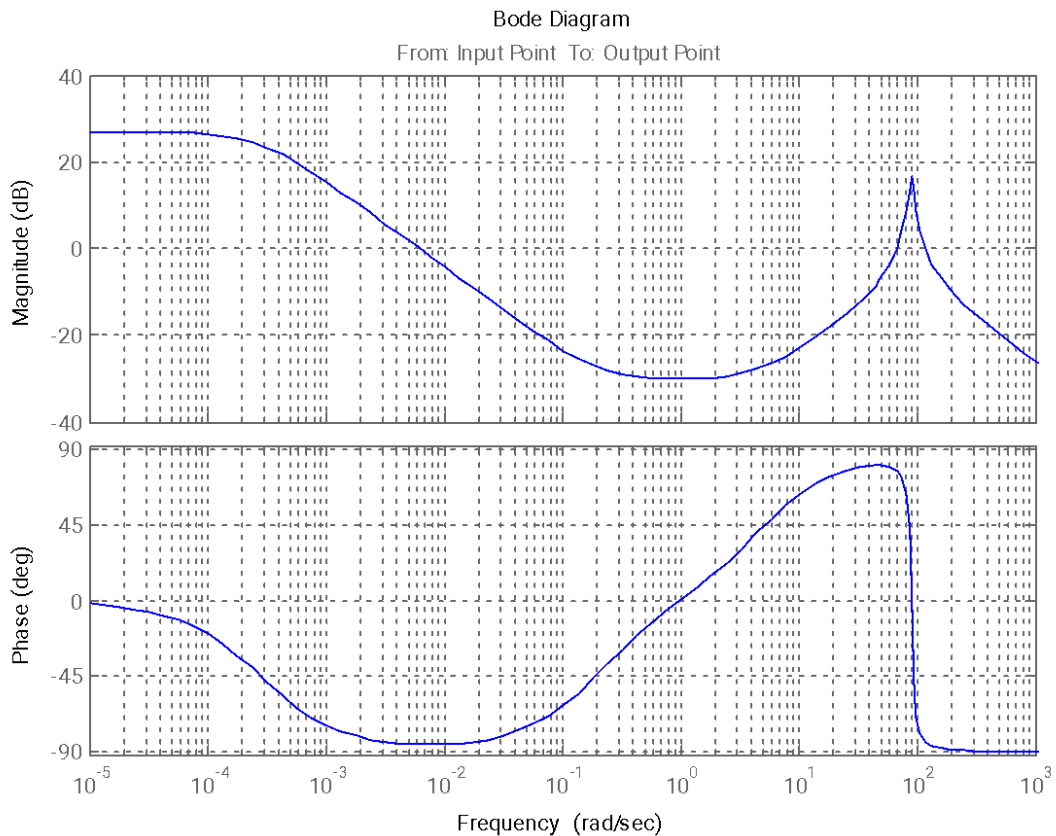


Рис. 3.17 Графіки логарифмічних частотних характеристик гіростабілізатора.

Аналізуючи графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ, можна зробити висновок, що система в замкненому стані буде стійкою при будь-яких значеннях коефіцієнта передачі.

Також це видно на годографі Найквіста, який не охоплює точку  $(-1, 0)$  на комплексній площині, що видно на рис.3.18.

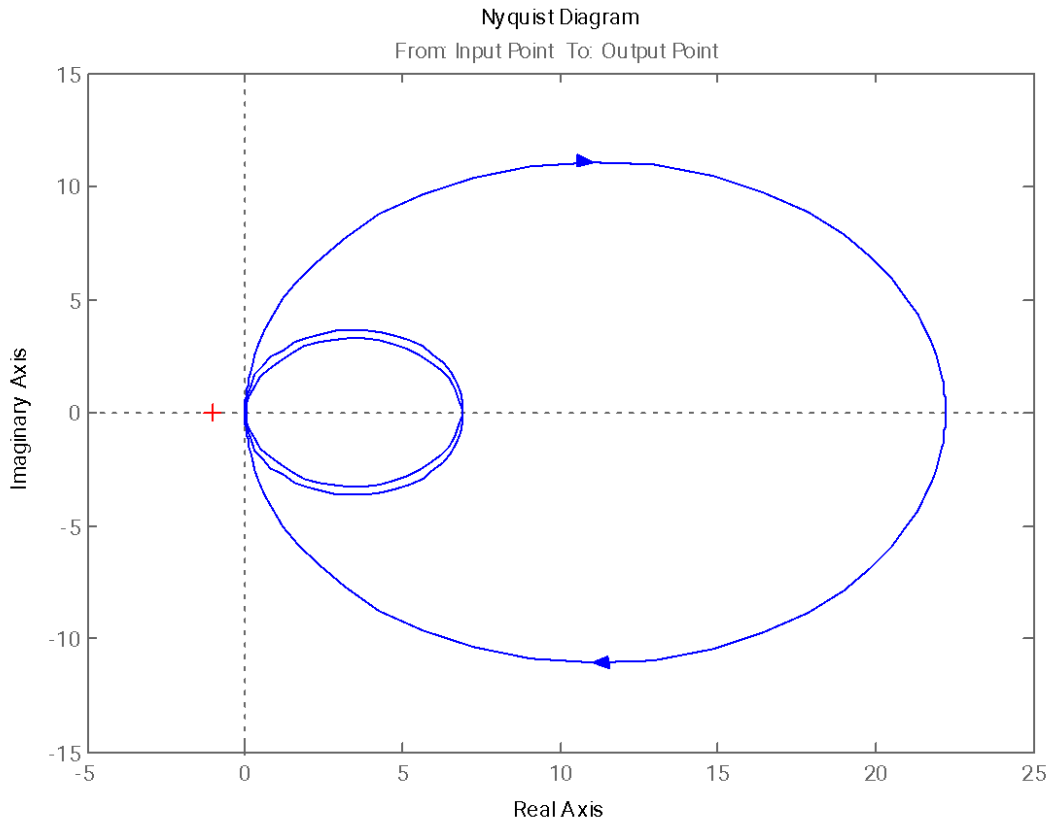


Рис. 3.18 Амплітудно-фазова частотна характеристика гіростабілізатора в розімкненому контурі.

### Висновок до 3 розділу

На основі обраної математичної моделі гіростабілізатора було побудовано його програмну модель в середовищі Matlab, яка складається з підпрограми правих частин рівнянь динаміки та основної програми в якій виводяться графіки кутових швидкостей та кутів, які характеризують динамічні властивості гіростабілізатора.

Розраховано контур стабілізації та побудована його модель за допомогою Simulink. Проведено моделювання роботи системи з контуром керування. Проведено аналіз частотних характеристик одного з каналів стабілізації, побудовано ЛАЧХ, ЛФЧХ та АФЧХ розімкненого контуру і зроблено висновок про стійкість замкненої системи.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «ГІРОСТАБІЛІЗАТОР КООРДИНАТОРА ДЛЯ ЛА»

#### 4.1 Опис ідеї та технологічний аудит ідеї проекту

В даному розділі наведено можливий варіант стартап-проекту, на основі розглянутого в попередніх розділах покращення методу стабілізації з метою підвищення точності та швидкодії. Ціллю якого в подальшому є адаптація і популяризація до інших профільних компаній, з метою отримання прибутку [30].

Зміст ідеї проекту полягає в розробці більш швидкого та точного процесу стабілізації гіроплатформи з подальшим втіленням її як більш рентабельну, у відповідних галузях.

**Таблиця 4.1**

**Опис ідеї стартап-проекту**

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Покращення процесу стабілізації з метою підвищення точності та швидкодії	1. Авіаційна промисловість	Покращення стабілізації обладнання на ЛА.
	2. Аерокосмічна промисловість	Покращення стабілізації обладнання різних масо-габаритних об'єктів
	3. Ракетобудування	
	4. Суднобудування	Покращення стабілізації обладнання на борту судна під впливом сильних зовнішніх збурень
	5. Військова промисловість	Покращення стабілізації обладнання різних масо-габаритних об'єктів

Далі проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначено перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначено попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

**Таблиця 4.2**

**Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту**

п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Safran Electronics & Defense	Honeywell	КБ «Луч»			
1	Точність	Висока	Середня	Середня	Низька			+
2	Швидкість	Висока	Середня	Низька	Низька			+
3	Вартість	740 \$	2100 \$	2500 \$	1770 \$			+

Після проведення аналізу сильних та слабких сторін своєї розробки у порівнянні з потенційними конкурентами, такими як КБ «Луч», Honeywell, Safran Electronics & Defense видно, що ті техніко-економічні характеристики, які взяті за мету цієї розробки, а саме підвищення точності і швидкодії процесу стабілізації, дають кращі результати ніж попередні запатентовані ідеї конкурентів, також при цьому проект має нижчу вартість.

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

**Таблиця 4.3**

**Технологічна здійсненність ідеї проекту**

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Покращення процесу стабілізації з метою підвищення точності	Вибір параметрів контуру керування на основі аналізу стійкості та частотних характеристик	Наявні	Доступні
2	Покращення процесу стабілізації з метою підвищення швидкодії		Наявна	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Вибір параметрів контуру керування на основі аналізу стійкості та частотних характеристик				

Проаналізувавши можливості технологічної реалізації проекту, можна зробити висновок, що даний проект можна впроваджувати за обраною технологією, тому що використовуючи цей метод, об'єкти, де застосовується дане обладнання виконують визначені дії швидше ніж попередники, отримуючи при цьому кращі результати по точності, а значить в більшості випадків впливають на якість виконання конкретної задачі і отримання задовільного результату по виконаній роботі.

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

## 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Спочатку було проведено аналіз попиту, який наведено в табл.4.4, він включає в себе: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку.

**Таблиця 4.4**

### Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
	Кількість головних гравців, од	5
	Загальний обсяг продаж, \$	3-5 млрд. дол
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Велика конкуренція Маловідомий бренд
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні у визначених сферах
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	16 %

Попередня характеристика потенційного ринку, показує, що ринок є привабливим для входу, враховуючи зростаючу динаміку ринку. Зростаюча динаміка ринку показує, що ринок активно розвивається, а значить готовий до входження нових гравців з кращими пропозиціями. Наявні обмеження для входу обумовлені конкуренцією.

Наступним кроком визначено потенційні групи клієнтів та їх характеристики. Окрім цього, для кожної групи клієнтів, сформовано приблизний перелік вимог до товару – дані в табл.4.5.

**Таблиця 4.5**

### Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Висока точність стабілізації обладнання	Авіаційна та аерокосмічна промисловість,	Особливості умов експлуатації:	Надійність, точність, швидкість,

		ракетобудування, суднобудування	- для кожної цільової групи важлива точність, швидкість та надійність	довготривалий строк служби, стійкість
2	Швидкість стабілізації обладнання	Авіаційна та аерокосмічна промисловість, ракетобудування, суднобудування		

З результату характеристики потенційних клієнтів, видно, що основна цільова аудиторія проекту, це є компанії які класифікуються на стабілізації об'єктів та обладнання авіаційної, аерокосмічної, ракетобудівної та суднобудівної промисловості. В даному випадку вимоги споживачів не відрізняються, але враховуючи цільовий сегмент ринку в якому буде застосовуватися продукт пріоритетність може відрізнятись.

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають в табл. 4.6 і табл.4.7. Фактори в таблицях подано в порядку зменшення значущості.

### Таблиця 4.6

#### Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція – міжнародні компанії та вітчизняні компанії	На міжнародному рівні на даному етапі реалізувати це досить складно. Вітчизняні замовники вже мають надійних виробників	Аналіз бар'єрів входу на ринок, пошук додаткових каналів для просування.
2	Вартість елементної бази	Збільшення ціни на комплектуючі продукту.	Модифікація продукту з метою заміни комплектуючих на більш доступні

3	Зменшення попиту	Зважаючи на те, що проект новий, темпи зростання можуть змінюватись, що спричинить зменшення попиту на продукт.	Краща пропозиція та гнучкі умови співпраці для розуміння потреб та можливих допрацювань.
4	Економічна	Унеможливлення розвитку проекту, у разі ускладнення економічної ситуації в країні.	Орієнтування на експорт

У табл. 4.6 описані види загроз, з яких самою головною є зріст конкуренції, в першу чергу локально, що в подальшому може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі характеристики. Інші загрози також потрібно враховувати, тому що наслідками від ігнорування цих загроз може бути зменшення попиту, що може спричинити відмову від товару, якщо не помітити і не відреагувати завчасно.

**Таблиця 4.7**

**Фактори можливостей**

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Продукт стане відомим широкому колу споживачів	Збільшення обсягів виробництва
2	Підвищення репутації	Вихід на конкурентно-спроможній рівень. Постійні клієнти	Систематична перевірка якості, для її контролю та покращення
3	Інтеграція методу до суміжних систем	Поширити дану ідею проекту для інших схожих за принципом дії приладів	Відкриття доступу до моделі проекту для користування і покращення своїх приладів іншим компаніям.
4	Нові потенційні групи клієнтів	Розвиток у іншому цільовому сегменті.	Вивчення загальних та унікальних потреб нового цільового сегменту.

Зростання попиту на товар, обрано головним фактором можливостей у табл. 4.6. Це може призвести в подальшому до збільшення обсягів виробництва, а також

підвищення рівня якості, тому що коло споживачів стане ширше, що розкриває актуальність та потенціал інших факторів.

Надалі проведено аналіз пропозиції: визначено загальні риси конкуренції на ринку, які наведено в табл.4.8.

**Таблиця 4.8**

**Ступеневий аналіз конкуренції на ринку**

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - нецінова	Велика конкуренція у галузі	Підвищення контролю якості товару, та збільшення обсягів виробництва
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потреба в цьому обладнанні вкрай необхідна і постійно потребує вдосконалень і заміни на нове	Активно слідкувати за ринком, щоб прогнозувати потреби клієнтів та обходити конкурентів
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Попит на товар є у декількох галузях	Аналізувати специфіку потреб клієнтів в різних галузях.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду	Підвищення співробітництва шляхом вигідних та гнучких умов співпраці. Калібрування обладнання під окрему задачу.
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Компанії-конкуренти розробляють продукцію за власним принципом. \ мають можливість вдосконалюватися і покращувати свою продукцію	Вдосконалення власного алгоритму розробки та підходів популяризації для більшого попиту\ збуту.
6. За інтенсивністю - марочна	Компанії конкуренти мають відомий бренд	Правильний підхід до реклами та залучення клієнтів. Знайти постійних клієнтів.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку на табл.4.8, що враховує вплив на діяльність підприємства особливостей конкурентного середовища, та можливі дії компанії для збереження конкурентоспроможності, показав, що конкуренція у галузі велика, між товарами одного виду. В свою чергу це спричиняє за собою

низку інших особливостей, які мають різні рівні загрози, але можуть регулюватися правильними та завчасними діями компанії.

Після аналізу конкуренції проведено більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера. М. Портер вирізняє п'ять основних факторів, що впливають на привабливість вибору ринку з огляду на характер конкуренції.

Сильні позиції компанії за кожним з факторів означають її можливості забезпечити необхідні темпи обороту капіталу та її здатність впливати на інших агентів ринку, диктуючи їм власні умови співпраці. Характеристики факторів моделі відрізняються для різних галузей та змінюються із часом. Сила кожного фактору є функцією від структури галузі та її техніко-економічних характеристик.

На основі аналізу складових моделі 5 сил М. Портера розроблено перелік факторів конкурентоспроможності для певного ринку.

**Таблиця 4.9**

**Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером**

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	КБ «ЛУЧ», Raytheon Technologies,	- Honeywell Corporation - Safran Electronics & Defense - United Technologies - Sikorsky Aircraft	Rockwell Automation Арсенал, Lockheed Martin Corporation	Аерокосмічна, авіаційна, судобудівна промисловість	Використання інших продуктів, які пропонує ринок.
Висновки:	Інтенсивність конкурентної боротьби досить висока.	Існують потенційні конкуренти. Доступна можливість виходу на ринок.	Постачальники не диктують умов ринку	Клієнти диктують умови роботи ринку, зважаючи на постійну потребу конкурентоспроможних результатів власного продукту	Наявне обмеження для роботи на ринку через товари-замінники у разі невдалого запуску стартапу.

Провівши аналіз конкуренції в обраній галузі за моделлю М. Портера, визначено, що на ринку можна працювати, попри те, що конкуренція у галузі присутня. Також присутні потенційні конкуренти, що можуть запропонувати щось більш вигідне для покупців в той чи інший період. Умови роботи на ринку постачальники не диктують, навідміну від клієнтів, тому що на даний час потреби можуть тільки збільшуватись. Для впевненого виходу на ринок потрібно мати наступні сильні сторони: точність та швидкість виконання основного призначення обладнання, надійність, гнучкість у співпраці та грамотний підхід до маркетингової кампанії.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл.4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту з табл.4.2, вимог споживачів до товару з табл.4.5 та факторів маркетингового середовища з табл. 4.6 і табл.4.7 визначено та обґрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності.

**Таблиця 4.10**

**Обґрунтування факторів конкурентоспроможності**

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність виконання роботи	Алгоритм системи стабілізації, налаштований на забезпечення високої точності
2	Швидкість виконання роботи	Висока швидкодія системи, що дозволяє швидше отримувати результат, тим самим забезпечуються готовність до виконання наступної задачі
3	Надійність	Система працює стабільно у різних галузях, де зовнішні збурення досить високі
4	Підтримка	Гнучкі умови співпраці для замовників. Та зручні умови обслуговування у разі потреби.
5	Маркетингова кампанія	Сучасний грамотний підхід до рекламної кампанії

Можна зробити висновок, що визначені фактори конкурентоспроможності повинні позитивно вплинути на розвиток проекту. У табл.10 наведено обґрунтування кожного з них, з якого видно фактори які підвищують значущість проекту на ряду з іншими.

**Таблиця 4.11****Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Гіростабілізатор координатора для ЛА»**

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з КБ «ЛУЧ»							
			-3	-2	-1		1	2	3	
1	Точність	17							+	
2	Швидкість	18							+	
3	Надійність	17					+			
4	Гнучкість	20								+
5	Маркетингова кампанія	20								+

За визначеними факторами конкурентоспроможності на табл.4.11, проведено аналіз сильних та слабких сторін у порівнянні з прямим конкурентом бачимо, що помітна відмінність є у точності та швидкодії, стосовно переваг не з технічної сторони, виділяється темп розвитку, спираючись на маркетингову кампанію та гнучкість у співпраці з клієнтами для їх лояльності та довіри.

На фінальному етапі ринкового аналізу можливостей впровадження проекту було складено SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak)) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) в табл.4.12 на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін з табл.4.11.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

**Таблиця 4.12****SWOT- аналіз стартап-проекту**

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока швидкодія</li> <li>2. Висока точність стабілізації</li> <li>3. Зручні умови співпраці</li> </ol>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конкуренти мають вищу репутацію та більше пропозицій прикладних товарів</li> <li>2. Метод не перевірений часом, тому поки не є надійним для споживачів</li> </ol>
<p><b>Можливості:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшення обсягів виробництва</li> <li>2. Можливість закріпитися на ринку</li> <li>3. Можливість подальшої співпраці</li> <li>4. Можливість просування з метою популяризації на різних ринках</li> </ol>	<p><b>Загрози:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нові конкуренти з кращим або схожим продуктом</li> <li>2. Загроза не прийняття товару, через будь-які проявлені недоліки</li> </ol>

Після проведення SWOT-аналізу, видно сильні та слабкі сторони, що несуть за собою відповідні можливості та загрози. Помітно, що можливостей відкривається більше, аніж загроз, але все ж таки потрібно враховувати, що будь-які зміни можуть спричинити нові загрози. На етапі розвитку головним виступає якість та розповсюдження широкому колу споживачів.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи проаналізовано з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів в табл.4.13.

**Таблиця 4.13****Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту**

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Кооперація (максимізація загального виграшу)	Висока	4-7 міс

2	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Середня	14 міс
3	Конкуренція (максимізація відносного виграшу)	Низька	24 міс

Провівши аналіз альтернатив ринкового впровадження стартапу, спираючись на більшу ймовірність отримання ресурсів за коротший термін, очевидним вибором стає кооперація. В порівнянні з іншими стратегіями, які значно програють по ймовірності отримання ресурсів і строкам реалізації, що також можна сказати про конкуренцію. Обраний нами метод за відносно короткий термін має високу ймовірність отримання ресурсів.

### 4.3 Базові стратегії розвитку та розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: цільові групи потенційних споживачів описано в табл.4.14.

**Таблиця 4.14**

#### Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Авіаційна промисловість	Потрібна сертифікація. Готові	Високий	Середня	Середня
2	Аерокосмічна промисловість	Потрібна сертифікація. Відносно готові	Високий	Середня	Висока
3	Суднобудування	Потрібна сертифікація.	Високий	Середня	Низька

		Відносно готові			
4	Ракетобудування	Потрібен час для тестування. Відносно готові	Середній	Висока	Висока
5	Військова промисловість	Потрібен час для тестування.	Високий	Високий	Висока
Які цільові групи обрано: Авіаційна промисловість, Суднобудування					

З описаних в таблиці профілів цільових груп потенційних клієнтів після проведення аналізу інтенсивності конкуренції, спираючись на фактори попиту в даній цільовій групі та простоту входу у сегмент обрано авіаційну та суднобудівну промисловість, також визначена готовність сприйняття продукту споживачами. В даному випадку, враховуючи два обраних сегменти, потрібно використовувати стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних вище сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку, яку наведено в табл.4.15.

**Таблиця 4.15**

**Визначення базової стратегії розвитку**

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Кооперація	Стратегія диференційованого маркетингу	Адаптація до вимог ринку. Якість та результативність продукту	Стратегія диференціації

В якості базової стратегії розвитку обрано стратегію диференціації, вона передбачає в собі корисні з точки зору споживача унікальні властивості, що і виокремлює його на фоні конкурентів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки, його наведено в табл.4.16.

**Таблиця 4.16****Визначення базової стратегії конкурентної поведінки**

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект не є «першопрохідцем»	Для компанії важливі обидва сегменти споживачів.	Компанія не буде копіювати основні характеристики товару конкурента.	Стратегія виклику лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту в табл.4.5, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку в табл.4.15 та стратегії конкурентної поведінки з табл.4.16 розроблена стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

**Таблиця 4.17****Визначення стратегії позиціонування**

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність	Стратегія диференціації	Вдосконалення процесу	Висока точність стабілізації
2	Швидкість процесу	Стратегія диференціації	Вдосконалення процесу	Збільшення швидкості стабілізації
3	Адаптивність \ Стійкість до зовнішніх збурень	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивність в експлуатації до умов зовнішніх збурень
4	Надійність роботи	Стратегія диференціації	Якість	Якісне надання результатів.

Спираючись на конкуренто-спроможні позиції сформульовано комплексну позицію власного проекту, яка складається з трьох ключових асоціацій: надійна, високоточна, швидка. Базова стратегія поведінки – стратегія виклику лідера, вона передбачає рішення атакувати лідера або ж йти за лідером. Клієнти плануються залучатися і конкурентні і нові.

Підсумувавши результати аналізу конкурентоспроможності товару, в табл.4.18 було сформовано маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

**Таблиця 4.18**

**Визначення ключових переваг концепції потенційного товару**

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Стабілізація обладнання	Покращення процесу стабілізації шляхом підвищення точності та швидкодії	Висока точність, швидкість виконання, широкий спектр використання, надійність, адаптивність

Як видно з табл.4.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у високій швидкодії та точності роботи, підтримки споживача у сфері обслуговування, можливостях широкого використання шляхом адаптації, відносно товарів конкурентів.

#### **4.4 Техніко-економічні характеристики товару**

Надалі розроблена трирівнева маркетингова модель товару, вона наведена в табл.4.19.

Таблиця 4.19

## Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає змогу виконувати стабілізацію масо-габаритних об'єктів більш точно та швидко		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність	1. 0.01 рад	Тл
	2. Швидкодія	2. 0.01 рад\с	Тл
	3. Надійність	3. 1000 год	Тл
	Якість: сертифікат відповідності якості ISO, IEEE		
Пакування: згідно вимог безпеки транспортування			
Марка: проект «Гростабілізатор»			
III. Товар із підкріпленням	До продажу Консультація по продукту		
	Після продажу Сервісна підтримка		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист товару проводиться шляхом отримання патенту на розробку.			

Після опису трьох рівнів моделі товару, чітко видно призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після продажу. Завдяки патентуванню буде здійснено захист товару від копіювання.

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком було визначено цінові межі в табл.4.20, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проведено експертним методом.

**Таблиця 4.20****Визначення меж встановлення ціни**

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1770 - 2000 \$	2100 - 2500 \$	25000 - 35000 \$	Нижня межа: 1970 \$ Верхня межа: 2370 \$

Рівень доходів кожної цільової групи досить великий. Було визначено встановлення ціни в межах від 1970 \$ – 2370 \$, базуючись на вартості складових частин та процесу виготовлення. Даний діапазон цін є оптимальним для користувача, враховуючи також перевагу в нижчій ціні.

Далі було визначено оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення, детальніше в табл.4.21:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

**Таблиця 4.21****Формування системи збуту**

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Оптові закупівлі	Зручні умови гарантійного та сервісного обслуговування.	Дворівневий	Компанії оптової торгівлі
2	Роздрібна торгівля	Зручні умови обслуговування. Процес оформлення продажу, доставку.	Однорівневий	Приватні підприємства.

Спираючись на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів розроблено концепцію маркетингових комунікацій, яка наведена в табл.4.22.

Таблиця 4.22

## Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Пошук продукту, який задовольнить наявні потреби на вищому рівні.	Інтернет, SMM, реклама, науково-технічні конференції	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Позиціонування за низькою ціною;</li> <li>- Позиціонування за співвідношенням "ціна – якість"</li> <li>- Позиціонування за двома ознаками</li> </ul>	Демонстрація переваг продукту, з подальшим залученням потенційного покупця до постійного клієнта.	Привернення уваги використовуючи у рекламі різні комбінації визначених стратегій позиціонування з закликком до дії.

Розроблена концепція маркетингових комунікацій, полягає у приверненні уваги клієнтів через інтернет ресурси за допомогою реклами, SMM, а також науково-технічних конференцій, притримуючись при цьому завдання та концепції рекламного повідомлення, які включають в себе визначені стратегії позиціонування.

## Висновки до 4 розділу

Даний розділ описує стратегію по створенню стартап-проекту, з метою подальшого втілення на ринок, як покращений метод стабілізації двовісного гіростабілізатора, що дозволить компаніям досягати кращих результатів у роботі та зменшення витрат за рахунок меншої вартості. Зміст ідеї проекту полягає у покращенні методу стабілізації з метою підвищення точності та швидкодії.

Провівши відповідні етапи перевірки та аналізу, можна почати з підсумку ринкової комерціалізації проекту. Великий попит на продукцію у авіаційній, аерокосмічній, ракетобудівній, суднобудівній та військовій галузях промисловості підтверджується позитивною динамікою росту, а також свідчить про потребу у якісному обладнанні для досягнення точних результатів.

Проаналізувавши в табл.4.2 сильні та слабкі сторони своєї розробки у порівнянні з потенційними конкурентами, визначив, що техніко-економічні характеристики, які взяті за мету, дають кращі результати ніж попередні запропоновані ідеї конкурентів, також при цьому продукт має нижчу вартість.

Звідси можна відмітити конкурентоспроможність проекту та додати, що перспективи впровадження проекту за обраною технологією реалізації, яка вказана в таблиці 3 можливі, попри високу конкуренцію. Про це додатково свідчить порівняльний аналіз сильних та слабких сторін, та фактори конкурентоспроможності, що сформовані на основі характеристичних таблиць факторів загроз і можливостей – де, як ключові переваги виокремлюють точність, швидкодію та надійність. Стосовно переваг не з технічної сторони, виділяється потенціал розвитку, спираючись на маркетингову кампанію та лояльність клієнтів сформовану на гнучкій співпраці.

Стратегія диференціації, яка обрана в якості базової стратегії розвитку, включає в себе метод кооперації, який в порівнянні з іншими стратегіями альтернативи ринкового впровадження стартапу, обумовлений більшою ймовірністю отримання ресурсів та меншими строками реалізації. Визначивши авіаційну та суднобудівну промисловість, як основні сегменти потенційних клієнтів обрано стратегію диференційованого маркетингу.

Отже, враховуючи концепцію маркетингової комунікації, яка передбачає залучення клієнтів поширюючи продукт за допомогою інтернет ресурсів, та інших каналів комунікації, подальша імплементація проекту вважається доцільною.

## ВИСНОВОК

В магістерській роботі було проведено моделювання з метою покращення методу стабілізації. Приділялась увага підвищенню точності та швидкодії процесу. Попередньо проведено огляд відповідної літератури з якої взята інформація для опрацювання – конструкції, закони керування гіростабілізаторами та елемента база останніх.

На основі цього була обрана математична модель гіростабілізатора, з яким проводились подальші дії щодо врегулювання питання більш якісної та швидкої стабілізації обладнання.

Обрана модель системи стабілізації включає модель стабілізованої платформи з гіроскопами, які використовуються для визначення кутової швидкості відхилення платформи від положення рівноваги. Далі проведено її детальний аналіз та скориговано відповідно до завдання на розробку системи стабілізації.

За допомогою програмного середовища Matlab побудовано програмну модель, в якій виводяться графіки кутових швидкостей та кутів, які характеризують динамічні властивості гіростабілізатора. Потім за допомогою Simulink було розраховано контур стабілізації та проведено моделювання роботи системи з контуром керування. Спираючись на аналіз частотних характеристик одного з каналів було побудовано ЛАЧХ, ЛФЧХ та АФЧХ розімкненого контуру і зроблено відповідні висновки по роботі системи.

Проведено опис ідеї стартап-проєкту та визначений перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару. Згідно відповідних таблиць, в яких зроблено аналіз конкуренції, проведено порівняння сильних та слабких сторін, та оцінено фактори можливостей і потенційних загроз, як таких, що можуть впливати на розвиток проєкту на ранніх стадіях, можна зробити висновок, що обґрунтовані в (табл.10) повинні позитивно вплинути на розвиток проєкту.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Сущенко О.А. Методика выбора гироскопического измерителя для системы стабилизации информационно-измерительных устройств / О.А. Сущенко, С.Г. Егоров, С.В. Карасев // *Електроніка та системи управління*. – 2011. – №4(30) – С.63– 67
2. *Systemy navedennia ta stabilizatsii ozbroiennia* / Bezvesilna O. M. et. al. Zhytomyr, 2014. 176 p
3. Two-Channel MEMS Gravimeter of the Automated Aircraft Gravimetric System / Korobiichuk I. et. al. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. P. 481–487. doi: [http://doi.org/10.1007/978-3-319-48923-0\\_51](http://doi.org/10.1007/978-3-319-48923-0_51)
4. Безвесільна О.М. Опис роботи стабілізатора складної навігаційної системи/ О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк// *Вісник Інженерної академії України*. – 2015. - №1. – С. 78-84
5. Безвесільна О. М. Коріолісовий вібраційний гіроскоп, як чутливий елемент комплексу управління системи стабілізації / О. М. Безвесільна, В. Г. Цірук, А. Г. Ткачук. // *Науковий журнал "Технологічні комплекси"*. – 2014. – №2(10). – С. 142– 147.
6. Hilkert, J.M. Inertially stabilized platform technology Concepts and principles. *IEEE Control Syst. Mag.* 2008, 28, 26–46.
7. Вознюк А. І. Аналіз параметрів системи непрямой стабілізації рухомих об'єктів під час руху пересіченою місцевістю / А. І. Вознюк. // *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*. – 2017. – №54(2). – С. 20–26. – ISSN 0201-744X, ISSN 0321-2211.
8. Безвесільна О. М. Дослідження впливу кутової швидкості обертання Землі на роботу навігаційних елементів гіростабілізатора / О. М. Безвесільна, В. Г. Цірук, Л. О. Чепюк. // *Вісник ЖДТУ*. – 2014. – №3(70). – С. 68–72.
9. Жеребко В. А. Розробка програмної моделі нейромережевого ПД-регулятора в середовищі LabVIEW / В. А. Жеребко, В. В. Афансьєв, А.

- С. Лясковський. // Проблеми програмування. – 2011. – №1. – С. 99–108. – ISSN 1727–4907.
10. Лобода О. І. Нечеткі адаптивні ПД-регулятори та методика їх налаштування / О. І. Лобода. // Науковий вісник ТДАТУ. – 2017. – Вип. 7, Т.1 – С. 162–167.
  11. Пекуровський Г. В. Налаштування параметрів ПД-регулятора при синтезі адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації. / Г. В. Пекуровський, О. В. Барабаш. // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – №4(32). – С. 139–142.
  12. Mu, Q.; Liu, G.; Lei, X. A RBFNN-based adaptive disturbance compensation approach applied to magnetic suspension inertially stabilized platform. *Math. Probl. Eng.* 2014, 2014, 464–483.
  13. Осовцев А. В. Аналіз систем стабілізації обладнання на рухомих об'єктах / А. В. Осовцев, Н. І. Бурау, А. І. Вознюк. // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси. – 2016. – №9. – С. 220–222.
  14. Осовцев А.В. Порівняння цифрового та аналогового регулятора у системі стабілізації обладнання / А.В. Осовцев, А.І. Вознюк // Погляд у майбутнє приладобудування: Збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів/ Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2018. — С. 45-48.
  15. Бурау Н.І. Аналіз напрямків удосконалення систем стабілізації та наведення обладнання на рухомих об'єктах / Н.І.Бурау, А.І. Вознюк, В.В. Цисарж // Вісник Інженерної академії України. – 2015. - №3. – С. 73-77.
  16. Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System / [Amr A. Roshdy, Chengzhi Su, Hany F. Mokbel et al.] // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2012. – Volume 2, Issue 2. – pp. 144–148.
  17. Лазарев Юрій Федорович Л17 Моделювання на ЕОМ. Навчальний посібник. - К.: Політехніка, 2007. - 290 с.

18. Zhang, Y.; Yang, T.; Li, C.; Liu, S.; Du, C.; Li, M.; Sun, H. Fuzzy-PID control for the position loop of aerial inertially stabilized platform. *Aerosp. Sci. Technol.* 2014, 36, 21–26
19. Навігаційні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / С.Л. Лакоза; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 80 с.
20. Лященко М. Я., Головань М. С. Чисельні методи: Підручник. – К.: "Либідь", 1996. – 288 с.
21. Investigation of the Effect of Gravity Anomalies on the Precession Motion of Single Gyroscope Gravimeter / Korobiichuk I. et. al. // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 251. P. 139–145.
22. Bereska D. et al. System for multi-axial mechanical stabilization of digital camera // *Vision Based Systems for UAV Applications*. – Springer, Heidelberg, 2013. – С. 177- 189.
23. Bryan N., Chappell S., Williams D. *Camera Stabilizer*. – 2016.
24. Осовцев А.В. Порівняння цифрового та аналогового регулятора у системі стабілізації обладнання / А.В. Осовцев, А.І. Вознюк // Погляд у майбутнє приладобудування: Збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів/ Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2018. — С. 45-48.
25. Голінко І. М. Налаштування системи із цифровим регулятором на заданий показник коливності [Електронний ресурс] / І. М. Голінко, Ю. М. Ковриго, А. І. Кубрак // ААЭКС, №1(23). – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://aaecs.org/golnko-mkovrigo-yum-kubrak-a-nastroika-sistemi-z-cifrovim-regulyatorom-na-zadanii-pokaznikkolivnost.html>.
26. Пекуровський Г. В. Налаштування параметрів ПД-регулятора при синтезі адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації. / Г. В. Пекуровський, О. В. Барабаш. // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – №4(32). – С. 139–142.
27. Пуйда В.Я. Розроблення структурної моделі мікропроцесорного підрегулятора [Електронний ресурс] / В.Я. Пуйда, Н.Т. Мандзевич. – 2014.– Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPKSM\\_2014\\_806\\_37.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPKSM_2014_806_37.pdf).
28. Liu, S.; Che, H.; Sun, L. Research on stabilizing and tracking control system

- of tracking and sighting pod. *J. Control Theory Appl.* 2012, 10, 107–112
29. Hilkert J. Inertially stabilized platform technology Concepts and principles // *IEEE Control Systems*. 2008. Vol. 28, Issue 1. P. 26–46. doi: <http://doi.org/10.1109/mcs.2007.910256>
30. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.