

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»  
УДК 621.317

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

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

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»**

**на тему: «Автоматизований ємнісний МЕМС чутливий елемент системи стабілізації»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПМ-31мп  
Бегов Антон Андрійович

Науковий керівник:

професор кафедри автоматизації та систем  
неруйнівного контролю АСНК д.т.н, проф.  
Безвесільна Олена Миколаївна

Консультант з розробки стартап-проєкту:

завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.  
Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:

професор каф. КІТВП, д.т.н. проф.  
Тимчик Григорій Семенович

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

Київ – 2024

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Бегову Антону Андрійовичу**

1. Тема дисертації «Автоматизований ємнісний МЕМС чутливий елемент системи стабілізації», науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від

«07» листопада 2024 р. № 4987-с

2. Термін подання студентом дисертації: 24.11.2024 р.

3. Об'єкт дослідження: процес вимірювання прискорення сили тяжіння автоматизованим ємнісним МЕМС чутливим елементом у складі АГС та системах стабілізації безпілотників.

4. Вихідні дані: двоканальний ємнісний чутливий елемент, експериментальна установка для проведення досліджень.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд чутливого елемента для вимірювання прискорень., побудова, принцип дії ЄЧЕ, математична модель ЄЧЕ, особливості конструкції ЄЧЕ, двоканальна конструкція ЄЧЕ, автоматизований ЄЧЕ у складі АГС, аналіз похибок ЧЕ, методи усунення похибок, огляд систем стабілізації та навігації, застосування нейромережевого підходу, алгоритм функціонування та інтеграції навігаційної системи АГС з використанням ЄЧЕ, експериментальне дослідження на ГМК-1, розробка стартап-проєкту, висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Принципова схема системи стабілізації АГС – 1 арк. А1, Принципова схема інерціальної навігаційної системи АГС – 1 арк. А1, Принципова схема повної для визначення аномалій ПСТ – 1 арк. А1, АГС з двоканальним ЄЧЕ – 1 арк. А1, схема АГС з використанням блоку нейромережі –1 арк. А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Безвесільна О.М., Бегов А.А. Ємнісний МЕМС чутливий елемент XIII Міжнародна науково-технічна конференція: “Інформаційно-комп’ютерні технології – 2023 (ІКТ-2023)” 30-31 березня 2023 р. м. Житомир. 2. Всеукраїнська конференція "Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні"- 2024

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Завідувач кафедри економічної кібернетики Бояринова К.О., д.е.н., проф.		

9. Дата видачі завдання: 01.09.2024 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури за темою		
2	Рівняння руху та математична модель	13.09.2024–19.09.2024	
3	Функціональна схема АГС	20.09.2024–20.10.2024	
4	Принципова схема стабілізації	20.10.2024–25.10.2024	
5	Принципова схема інерціальної навігаційної системи	25.10.2024–02.11.2024	
6	Аналіз похибок. Методи покращення вимірювань	03.11.2024–07.11.2024	
7	Алгоритм нейромережевого підходу	07.11.2024–11.11.2024	
8	Виконання експериментальних та розрахункових досліджень	11.11.2024–17.11.2024	
8	Розробка стартап-проекту	18.11.2024-20.11.2024	
9	Оформлення ПЗ та графічного матеріалу	20.11.2024–24.11.2024	

Студент

Антон БЄГОВ

Науковий керівник

Олена БЕЗВЕСІЛЬНА

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

## АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків до усієї виконаної роботи та списку використаної літератури. Дисертація містить 106 сторінок основного тексту, 37 ілюстрацій, 40 таблиць та 30 посилань. Загальний обсяг магістерської дисертації склав 113 сторінок.

**Мета і задачі роботи.** Метою магістерської дисертації є дослідження ємнісного MEMS чутливого елемента системи стабілізації.

**Об'єктом дослідження:** процес вимірювання прискорення сили тяжіння автоматизованим ємнісним MEMS чутливим елементом у складі АГС та системах стабілізації безпілотників.

**Предметом дослідження:** є ємнісний чутливий елемент системи стабілізації.

**Методи дослідження:** метод, покладений в основу роботи ємнісного чутливого елемента, базується на зміні ємності між обкладинками, що виникає через переміщення рухомої інерційної маси внаслідок дії прискорення сили тяжіння.

**Новизна отриманих результатів:** Запропоновано та досліджено новий двоканальний ємнісний MEMS гравіметр АГС. Обґрунтовано, що завдяки використанню двох каналів ємнісного MEMS гравіметра забезпечено підвищення точності та швидкодії вимірювань ПСТ.

**Практичне значення результатів:** Розглянуто особливості конструкції ЧЕ, двоканальну конструкцію СЧЕ. Розглянуто методи усунення похибок зміщення нуля пункту. Наведено огляд методу збільшення кількості вимірювань. Запропоновано огляд методу програмної компенсації. Огляд методу з ускладнення конструкції. Розглянуто застосування нейромережевого підходу для розробки алгоритмів функціонування АГС та корекції системи стабілізації та інерціальної навігаційної системи. Розглянуто конструкцію трикоординатного ємнісного гравіметра з двоканальною конструкцією кожної з осей.

**Ключові слова:** прискорення сили тяжіння, ємнісний чутливий елемент, авіаційна гравіметрична система, система стабілізації.

## ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, 5 chapters, conclusions to all the work done, and a list of references. The thesis contains 106 pages of main text, 37 illustrations, 40 tables and 30 references. The total volume of the master's thesis is 113 pages.

**Purpose and objectives of the work.** The purpose of the master's thesis is to study the capacitive MEMS sensitive element of the stabilization system.

**The subject of research:** the capacitive sensing element of the stabilization system.

**Research methods:** the method underlying the operation of the capacitive sensing element is based on the change in capacitance between the covers, which occurs due to the movement of a moving inertial mass due to the acceleration of gravity.

**Novelty of the results:** A new two-channel capacitive MEMS gravimeter AGS has been proposed and investigated. It is substantiated that the use of two channels of the capacitive MEMS gravimeter provides an increase in the accuracy and speed of the PST measurements.

**Practical significance of the results:** The features of the design of the CE, the two-channel design of the ECE are considered. Methods for eliminating zero-point offset errors are considered. An overview of the method of increasing the number of measurements is given. An overview of the program compensation method is given. An overview of the method of design complication is given. The application of the neural network approach to the development of algorithms for the functioning of the AGS and the correction of the stabilization system and the inertial navigation system is considered. The design of a three-axis capacitive gravimeter with a two-channel design of each of the axes is considered.

**Keywords:** acceleration of gravity, capacitive sensing element, aviation gravimetric system, stabilization system.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

$$1\text{мГал} = 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad \left(1\text{Гал} = 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}\right)$$

АГС – авіаційна гравіметрична система

САК – система автоматичного керування

ГСП – гіростабілізована платформа

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

НК -навігаційний комплекс

ЄГ – ємнісний гравіметр

ДЄГ – двоканальний ємнісний гравіметр

ЧЕ – чутливий елемент

ЄЧЕ – ємнісний чутливий елемент

НК -навігаційний комплекс

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД БЕЗПІЛОТНИКІВ. ОГЛЯД ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ .....	9
1.1 Сфери застосування та можливості безпілотників.....	9
1.2 Класифікація безпілотників .....	11
1.3 Безпілотник PD2.....	14
1.4 Основні навігаційні системи безпілотників .....	16
1.5 Принцип систем стабілізації та навігації безпілотників.....	18
1.6 Чутливі елементи в системах стабілізації та керуванні апаратами .....	19
1.7 Методи вимірювання прискорення сили тяжіння .....	20
1.8 Огляд чутливих елементів та принцип дії.....	22
1.8.1 Струнний гравіметр .....	22
1.8.2 П'єзоелектричний гравіметр.....	24
1.8.3 Гіроскопічний гравіметр .....	25
1.8.4 Балістичний лазерний гравіметр .....	27
1.8.5 Ємнісний гравіметр .....	29
Висновок до розділу 1 .....	30
Мета та актуальність обраної теми .....	31
РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ МЕМС ЄЧЕ. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РІВНЯННЯ РУХУ У СКЛАДІ АГС. СИСТЕМА ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ДЛЯ АГС. СТРУКТУРНА СХЕМА ЄЧЕ .....	33
2.1 Принцип дії ємнісного ЧЕ.....	33
2.2 Конструкція МЕМС ЄЧЕ .....	33
2.3 Основні параметри ЧЕ.....	37
2.4 Рівняння руху ЧЕ в умовах установки на Землі .....	38
2.5 Двоканальна схема ЄЧЕ .....	42
2.6 Рівняння руху у складі АГС.....	42
2.7 Функціональна схема АГС.....	45
2.8 АГС з використання двоканального ЄЧЕ.....	45
2.9 Принципова схема стабілізації АГС .....	46
2.10 Принципова схема інерціальної навігаційної системи АГС .....	48
2.11 Принципова схема повної системи для визначення аномалій ПСТ .....	49

2.12 Структурна схема ЄЧЕ .....	50
2.12.1 Структурна схема одноканального ЄЧЕ .....	50
2.12.2 Структурна схема двоканального ЄЧЕ.....	52
Висновки до розділу 2 .....	53
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПОХИБОК ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АГС З ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ. ТРИКООРДИНАТНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄЧЕ.....</b>	<b>54</b>
3.1 Аналіз похибок ДЄГ .....	54
3.2 Похибка зумовлена зміщенням нуля пункту .....	58
3.2.1 Метод збільшення кількості вимірювань .....	59
3.2.2 Метод програмної компенсації.....	59
3.2.3 Метод ускладнення конструкції.....	59
3.3 АГС з використанням нейромережі .....	61
3.4 Трикоординатний двоканальний ЄЧЕ .....	63
Висновок до розділу 3 .....	64
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄЧЕ. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ. ОГЛЯД ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛУ ЄЧЕ ПРИ ДІЇ ЗБУРЕНЬ.....</b>	<b>65</b>
4.1 Дослідження стійкості двоканального МЕМС ЄЧЕ.....	65
4.2 Стійкість системи за критерієм Гурвіца .....	66
4.3 Стійкість системи за критерієм Гурвіца .....	67
4.4 Програма для моделювання роботи двоканального ЄЧЕ під дією збурень	68
4.5 Інтерфейс програмного забезпечення на ЕОМ.....	69
4.6 Цифрове моделювання збурень двоканального ЄЧЕ.....	69
4.7 Експериментальне дослідження ЄЧЕ на лабораторному стенді .....	70
4.8 Двоканальний ємнісний чутливий елемент .....	71
4.9 Вібростенд лабораторної установки .....	71
4.10 Установа для градування ЄЧЕ.....	72
4.11 Параметри роботи установки.....	74
4.12 Проведення експерименту чутливих елементів .....	75
4.13 Метрологічні характеристики чутливих елементів.....	78
Висновки до розділу 4 .....	79
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «STABFLY SYSTEM» .....</b>	<b>80</b>
5.1 Опис ідеї проєкту .....	80



5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту.....	84
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	87
5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту .....	97
5.5. Розроблення маркетингової програми та планування реалізації стартап-проєкту .....	100
Висновки до розділу 5 .....	104
ВИСНОВКИ .....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	108

## ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) зайняли важливе місце в різних сферах діяльності та мають широкий спектр застосування, від звичного моніторингу об'єктів до виконання складних інженерних завдань. Кількість нових застосувань апаратів зростає.

Для задач підвищеної складності використовують автоматизовані системи управління БПЛА, які здатні забезпечити високу точність та швидкість виконання завдань, мінімізуючи вплив оператора на процес управління. При виконанні таких завдань часто застосовують рої БПЛА, які спільно функціонують та самостійно приймають рішення. Сучасні автономні безпілотники повинні вміти аналізувати навколишнє середовище, прокладати маршрут руху та забезпечувати орієнтацію в просторі. Для кращої орієнтації використовується поєднання супутникових і інерціальних навігаційних систем, що забезпечує точність та автономність їх роботи. Інерціальна навігаційна система забезпечує роботу в умовах, де немає доступу до супутникових систем навігації. Основним недоліком ІНС є похибки з часом, що потребують періодичної корекції координат.

Система стабілізації є важливою при розробці нового БПЛА. Для налаштування та корекції ІНС та позиціонування доцільно вимірювати точні значення гравітаційного прискорення ( $g$ ). Точне вимірювання прискорення сили є ключовим і для проведення гравіметричних досліджень. Точні значення гравіметричних досліджень потрібні для різних наукових, інженерних та практичних задач, зокрема при геофізичних досліджень та розвідки ресурсів.

Нові технології дозволяють вимірювати прискорення сили з високою точністю, проте для деяких задач і така точність є недостатньою. Метою роботи є дослідження чутливих елементів, які вимірюють це прискорення. Перевагу б'єкло надано ємнісним чутливим елементам. В роботі буде розглянуто двоканальну конструкцію елементів, а також методи покращення вимірювання та обробки вимірювань прискорення та системах стабілізації. Чутливі елементи, що використовуються для цих вимірювань, схильні до похибок через вплив шумів, вібрацій та нестабільних зовнішніх умов. Все більше уваги приділяється

застосуванню елементів штучного інтелекту для обробки даних сенсорів. Алгоритми машинного навчання можуть адаптуватися до умов реального часу, автоматично визначати та компенсувати нетипові зміни, а також виявляти систематичні похибки в роботі сенсорів. Застосування елементів штучного інтелекту дозволяє підвищити точність і надійність обробки, забезпечити адаптивність до змінних умов і суттєво розширити функціонал системи.

В даній дисертації чутливим елементом для систем стабілізації буде розглянуто ємнісний МЕМС чутливий елемент для вимірювання динамічного та статичного прискорення. Ємнісні чутливі елементи здатні вимірювати дуже малі зміни прискорень та мають високу механічну міцність і стійкість до вібрацій та ударів, що дозволяє використовувати їх у складних умовах. Використання МЕМС є дуже розвинутим в даний час і обраний напрямок є перспективним для дослідження та впровадження все більше таких чутливих елементів в системах стабілізації та систем вимірювань. В подальшому результат інтеграції методів штучного інтелекту з традиційними алгоритмами обробки може створити ефективний інструмент для вирішення завдань стабілізації, навігації та проведенні гравіметричних досліджень, навіть у складних умовах експлуатації.

# РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД БЕЗПІЛОТНИКІВ. ОГЛЯД ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ

## 1.1 Сфери застосування та можливості безпілотників

Розглянемо основні сфери застосування безпілотників на рис 1.1



Рисунок 1.1 – Сфери застосування безпілотників

Сучасні безпілотники мають багато функціональних можливостей, які забезпечують їхню ефективність та універсальність у різних сферах застосування. Однією з ключових є автономне планування маршруту та виконання польоту без постійного втручання оператора. Це дозволяє апарату самостійно переміщатися у повітрі, підтримуючи стабільну висоту, швидкість та курс навіть у змінних погодних умовах завдяки використанню GPS та інших навігаційних систем.

Крім того, сучасні БПЛА оснащені системами виявлення та уникнення перешкод, що забезпечує безпечний політ у складних середовищах. Високоякісна аерозйомка для моніторингу, картографування та інспекцій дозволяє використовувати безпілотники для точного збору даних та створення моделей місцевості.

Оптимізація енергоспоживання та використання ефективних паливних або електричних джерел живлення забезпечують тривалий час перебування в повітрі, що розширює можливості застосування БПЛА в різних умовах. Можливість програмування специфічних завдань та адаптації до різних умов експлуатації через оновлення програмного забезпечення робить безпілотники гнучкими інструментами для виконання різноманітних задач.

Сучасні безпілотники оснащені системами захисту від несанкціонованого доступу та втручання, що забезпечує безпечне повернення апарата в разі виникнення непередбачених обставин. Використання GPS та інших навігаційних систем дозволяє створювати точні мапи та моделі місцевості, що є важливим для різних аналітичних та оперативних завдань. Значно перевершують пілотовані літальні засоби за багатьма критеріями. Вони можуть виконувати завдання у небезпечних умовах, де використання пілотованої авіації є неможливим через неприйнятний ризик для пілотів. Компактні розміри, висока маневреність і проста конструкція дозволяють швидко розгортати БПЛА в умовах обмеженого простору, складної місцевості або густонаселених районів. Їх експлуатація є значно дешевшою, оскільки вони не потребують великих ресурсів, тривалої передпольотної підготовки чи складного обслуговування. Апарати можуть працювати незалежно від погодних обмежень, таких як низька видимість або щільна хмарність, що ускладнює польоти пілотованих апаратів. Простота керування дозволяє використовувати їх операторами з мінімальним рівнем підготовки. Можливість швидкої заміни та адаптації корисного навантаження та швидко приводяться в дію, що особливо важливо в екстрених ситуаціях.

## 1.2 Класифікація безпілотників

Широкий спектр застосування обумовлений швидким розвитком технологій, що дозволяє інтегрувати в компактні конструкції дедалі більше чутливих елементів, сенсорів та автоматизованих систем, що збільшує їхню функціональність. Всі вони відрізняються за технічними та конструктивними характеристиками, що ускладнює їх класифікацію, яка потребує багатовимірного підходу. Розглянемо класифікацію, яка є актуальною на даний час на рис.1.2 [1].

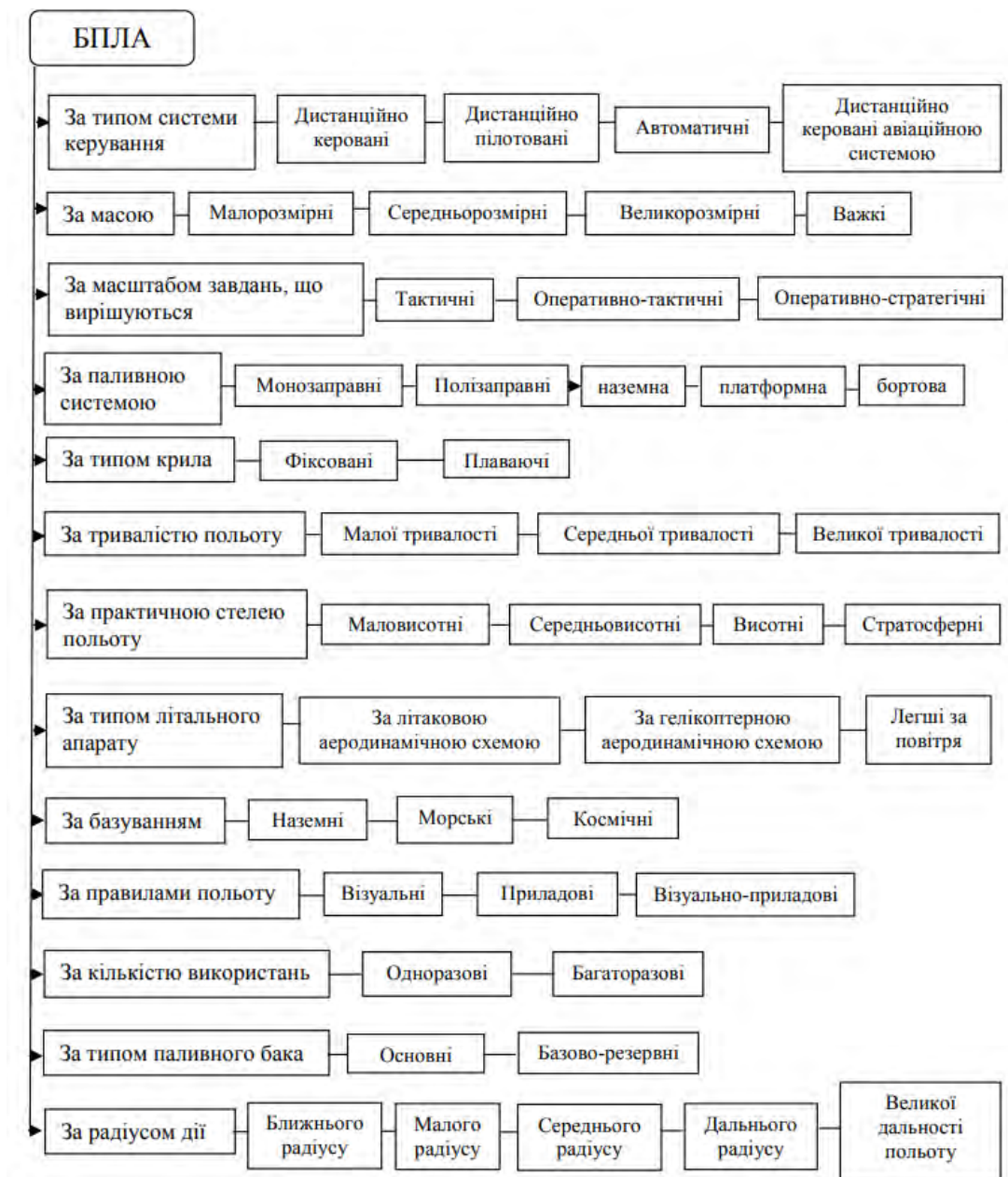
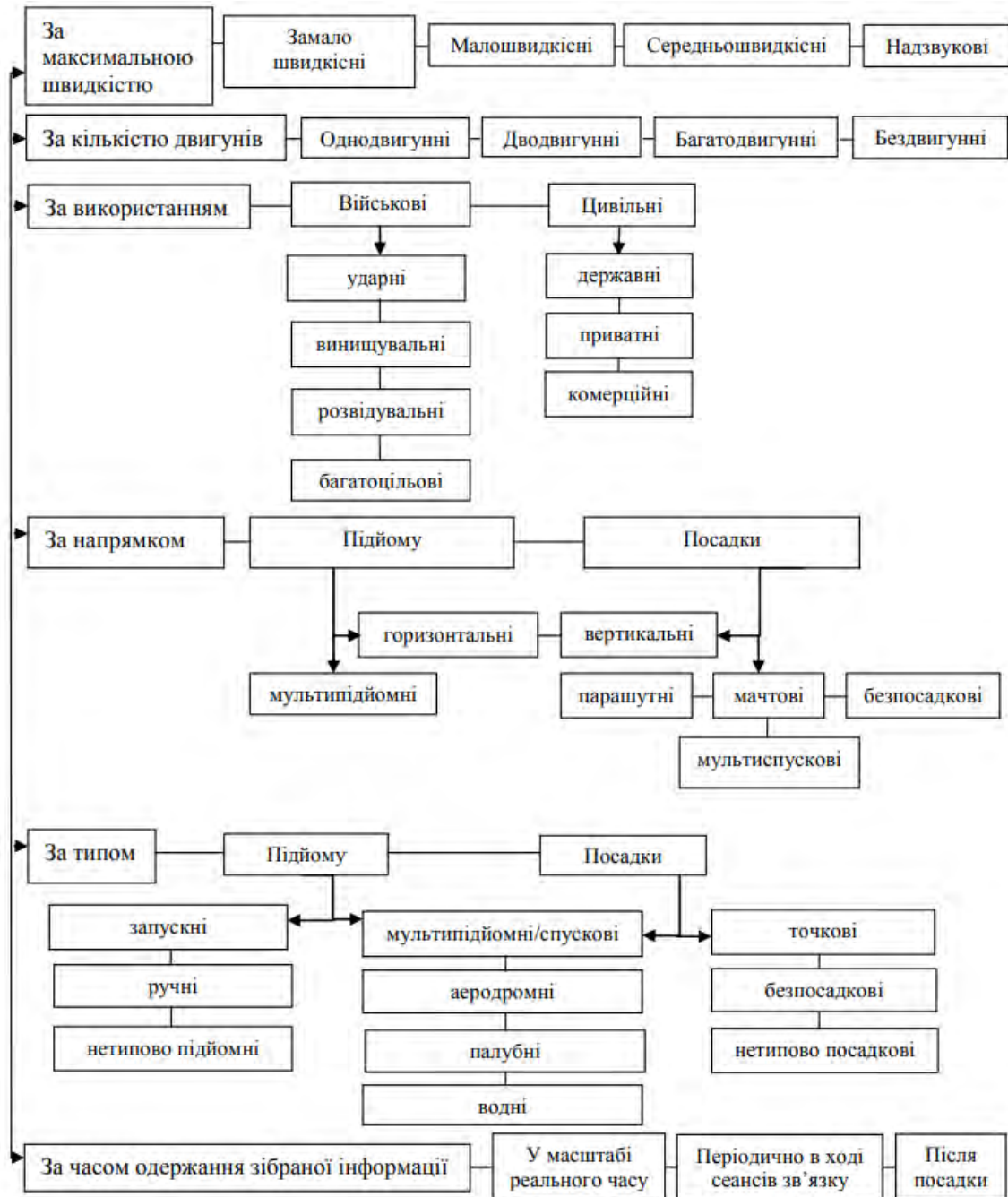


Рисунок 1.2 – Класифікація безпілотників [1] (продовження на наступній сторінці)

Продовження рисунка 1.2 [1]



Варто розглянути трохи зведену класифікацію літальних апаратів та комплексів у нормативному документі правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України у таблиці 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Зведена класифікація безпілотників за основними ознаками [2].

Клас	Рівень застосування	Бойовий радіус	Категорія БпЛА БпАК держав - членів НАТО
I клас	Мікро (тактичні) злітна маса < 2 кг	до 5 км (зона прямої видимості)	Micro
	Міні (тактичні поля бою) 2 кг ≤ злітна маса ≤ 15 кг	більше 5 км (зона прямої видимості)	Mini
	Малі (тактичні) злітна маса > 15 кг	більше 25 км (зона прямої видимості)	Small
II клас 150- 600кг	Тактичні (оперативно- тактичні)	більше 50 км (зона прямої видимості)	Tactical
III клас >600кг	Оперативні	більше 200 км (поза зоною прямої видимості)	MALE
	Стратегічні	більше 200 км (поза зоною прямої видимості)	HALE

Сучасні безпілотники складно класифікувати оскільки по масі вони відносяться до одного класу, а по дальності польоту до іншого, різниця в конструкції, типу зліту та інші. З постійним випуском нових моделей безпілотників, існуючі класифікації можуть не враховувати всі види, які доступні сьогодні. Ця галузь швидко змінюється, і нові технологічні розробки приводять до появи нових типів та категорій.

Існуючі класифікації не є повними і можуть вимагати періодичного оновлення та розширення. Оскільки цей сегмент продовжує розширюватись та еволюціонувати, важливо враховувати нові моделі та враховувати їх у подальших класифікаціях, щоб бути більш точним і актуальним у визначенні різних ви.



### 1.3 Безпілотник PD2



Рисунок 1.3 – Безпілотник PD2

PD-2 - український багатоцільовий БПЛА виробництва Ukrspecsystems. Призначений для здійснення повітряної розвідки та бойового застосування як носій бомбового навантаження з бойовою частиною вагою до 3 кг. Безпілотник PD-2, який є глибокою модернізацією PD-1 зі збільшенням корисного навантаження, дальності зв'язку та іншими вдосконаленнями. Літак комплектується швидкозйомними модулями з додатковими електричними двигунами (системою вертикального зльоту та посадки — СВЗП), які дозволяють БПЛА здійснювати вертикальний зліт та посадку [3].

Таблиця 1.2 – Льотні характеристики апарату [3].

Параметр	Значення
Максимальна швидкість	140 км/год (87 миля/год; 76 вуз)
Крейсерська швидкість	100 км/год (62 миля/год; 54 вуз)
Дальність	1 000 км (621 миля; 540 морська миля)
Тривалість польоту	12 годин (без СВЗП)
Практична стеля	5 000 м (16 404 фут)
Швидкопідйомність	3 м/с (590 фут/хв)
Швидкість зниження	3 м/с (590 фут/хв)
Дальність зв'язку	220 км

На рис.1.4 наведено нові функціональні можливості безпілотної літачки

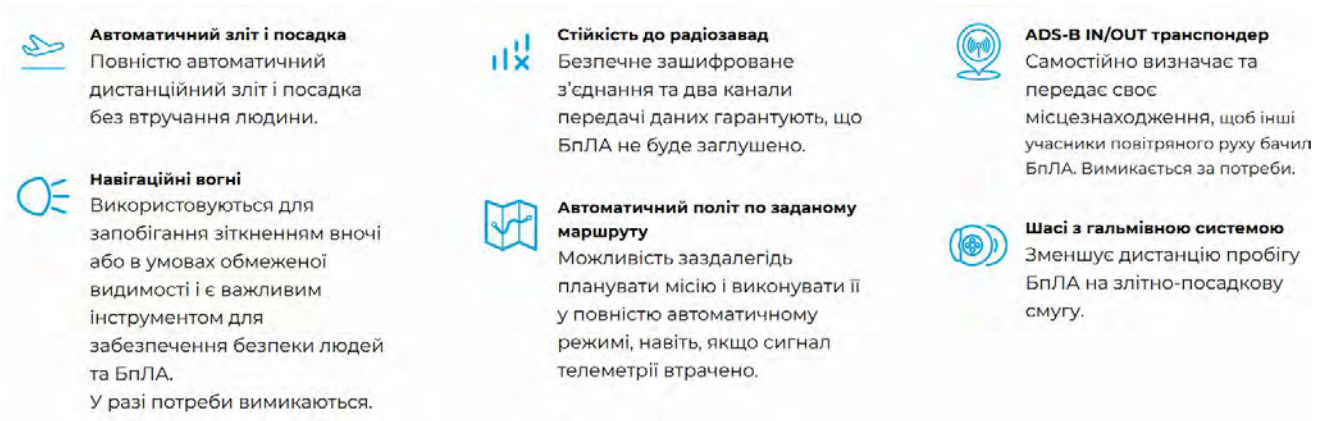


Рисунок 1.4 – Перелік нових можливостей апарату [4]

На рис. 1.5 показано корисне навантаження, яке може нести такий безпілотної літачки



Рисунок 1.5 – Корисне навантаження безпілотної літачки

Багатофункціональні гіростабілізовані оптико-електронні системи серії USG-400 EO/IR/LRF призначені для виконання спостережних, тактичних, пошуково-

рятувальних та військових завдань. Геодезична аерофотозйомка дозволяє створювати високоякісні карти з високою роздільною здатністю.

На рис.1.6 зображено приклад геодезичної розвідки безпілотником з використанням гіростабілізованих оптико-електронних систем серії USG-400 [4].



Рисунок 1.6 – Геодезична розвідка з безпілотника

Під час випробування PD-2 на висоті 1000 м проводилась аерофотозйомка з роздільною здатністю менш ніж 5 см. Знімки, прив'язані за технологією РРК, забезпечили створення цифрової моделі поверхні та ортофотоплану з точністю прив'язки менш як 5 см. Продуктивність склала 20 км<sup>2</sup>/год, що дозволяє знімати понад 160 км<sup>2</sup> за добу залежно від погодних умов. Політ виконувався відповідно до Положення про використання повітряного простору України [5].

#### **1.4 Основні навігаційні системи безпілотників**

Основні навігаційні системи [6]:

- інерціальні навігаційні системи (ІНС);
- глобальні навігаційні супутникові системи;
- навігаційні системи на основі комп'ютерного зору;
- комбінована система.

**Інерціальна навігаційна система** (ІНС) є самостійним вузлом і може містити гіроскопи, акселерометри та обчислювальні пристрої, що не потребують надходження додаткових даних з навколишнього середовища чи інших джерел. Система дозволяє досить точно визначати лінійне прискорення БПЛА за трьома координатними осями, кутову орієнтацію та координати місцезнаходження [6].

**Глобальні навігаційні супутникові системи** (GNSS) включають кілька основних систем, які забезпечують навігацію та позиціонування по всьому світу. GPS (Global Positioning System) – американська система, найбільш поширена для цивільних і військових цілей. GLONASS – російська альтернатива GPS. Galileo – європейська система, яка вирізняється високою точністю. BeiDou – китайська супутникова система, що надає глобальні послуги. Окрім глобальних систем, існують регіональні, такі як IRNSS (NavIC), що забезпечує навігацію в Індії, та QZSS, японська система, яка доповнює GPS у Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Одразу [6] можна сказати про один, досить вагомий, недолік цієї системи: для визначення місця перебування потрібен безперебійний сигнал, який досить важко забезпечити та легко навмисно заглушити. Відсутність сигналу навіть на відносно невелику тривалість часу може призвести до повної втрати орієнтації БПЛА. **Навігаційні системи на основі комп'ютерного зору** відповідають за визначення географічних координат розташування БПЛА, можуть забезпечити його автоматичне переміщення з однієї точки до іншої. Використання комп'ютерного зору має на увазі застосування технологій штучного інтелекту. Система отримує зображення від встановлених камер та має проаналізувати їх, керуючись алгоритмами та принципами, що були сформовані під час попереднього навчання [6]. Поширеними методами обробки є сегментація та обмежувальні рамки. **Комбінована система** включає поєднання одночасно двох систем: глобальної навігаційної супутникової системи та інерціальної навігаційної системи.

## 1.5 Принцип систем стабілізації та навігації безпілотників

Принцип стабілізації та навігації безпілотників передбачає реалізацію механізмів, які забезпечують стійкість польоту та здатність апарата досягати заданої траєкторії за умов автономної чи автоматизованої роботи. Ці принципи засновані на комплексній взаємодії апаратних і програмних засобів, що дозволяють апарату адаптуватися до змін у навколишньому середовищі й виконувати складні маневри без втручання оператора. Системи стабілізації включають в себе механізми, які дозволяють зберігати стійкість апарата за різних умов польоту. Дані з сенсорів обробляються за допомогою спеціалізованих алгоритмів, фільтрів, нейромережевих блоків та інших, що забезпечують швидке й точне реагування на зміни умов польоту. Щодо навігації, сучасні безпілотники можуть використовувати кілька режимів роботи: керований, автоматизований і автономний. Автономна навігація передбачає здатність апарата визначати своє місцезнаходження за допомогою GPS-модулів, інерційних навігаційних систем та інших пристроїв. Крім того, системи навігації мають можливість коригувати траєкторію польоту, уникаючи перешкод та оптимізуючи маршрут відповідно до заданих параметрів. Для забезпечення стабільності польоту також важливо враховувати фактори зовнішнього середовища, такі як сила і напрям вітру, зміни температури і тиску. Ці дані збираються за допомогою відповідних сенсорів, інтегрованих у систему, і обробляються для забезпечення плавного польоту. У разі виявлення критичних відхилень система стабілізації може автоматично перейти в аварійний режим, щоб мінімізувати ризики пошкодження апарата.

Варто зазначити важливість стабілізації апарату під час проведення вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння. Для авіаційних гравіметричних систем стабільність польоту є критичною, оскільки навіть незначні коливання можуть суттєво вплинути на точність отриманих даних. Тому інтеграція стабілізаційних механізмів із системами вимірювання гравітаційного поля дозволяє досягти високої точності й надійності під час виконання задач у сфері геофізики, картографії та моніторингу природних ресурсів. Стабілізація апарату

повинна забезпечувати ефективну роботу гравіметрів на борту у динамічних складних умовах, зокрема бути досить чутливою до будь яких змін, дозволяючи мінімізувати похибки вимірювань і адаптувати траєкторію польоту до рельєфу місцевості. Використання авіаційних гравіметричних систем на безпілотниках відкриває нові можливості в дослідженні гравітаційних аномалій, що має значення для наукових і прикладних задач. Окрім цього, стабілізація є надзвичайно важливою і для комерційного використання, зокрема для доставки невеликих вантажів. У таких завданнях корекція траєкторії, точне позиціонування та вимірювання параметрів дозволяють забезпечити ефективність і безпеку виконання поставлених задач.

## **1.6 Чутливі елементи в системах стабілізації та керуванні апаратами**

Чутливі елементи є важливими компонентами в системах стабілізації безпілотних літальних апаратів. Вони забезпечують отримання даних про стан апарата та умови навколишнього середовища, які необхідні для стабільного польоту й виконання завдань. Основною функцією чутливих елементів є перетворення фізичних величин у сигнали, що можуть бути оброблені системою керування.

До основних чутливих елементів належать акселерометри, гіроскопи, барометри, магнітометри та далекоміри. Вони забезпечують вимірювання відповідних фізичних параметрів, таких як орієнтація, прискорення, висота і відстані, які використовуються для стабілізації та навігації.

Особливу увагу слід приділити використанню MEMS (мікроелектромеханічних систем), які мають низку важливих переваг. MEMS-сенсори характеризуються компактними розмірами, низьким енергоспоживанням, високою точністю та надійністю. Завдяки мініатюризації, такі датчики легко інтегруються в сучасні системи стабілізації БПЛА,

забезпечуючи ефективну роботу вимірювань у складних умовах. Крім того, MEMS-сенсори дозволяють знизити вагу апарата, що є важливим для збільшення тривалості польоту та зменшення енергоспоживання. Ще однією перевагою MEMS є їх здатність працювати з великим обсягом даних у реальному часі, що забезпечує більш точне й швидке реагування системи стабілізації на зміну умов. У сфері гравіметричних вимірювань MEMS-акселерометри дозволяють проводити точні вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Подальше вдосконалення MEMS-технологій сприяє створенню більш точних і чутливих сенсорів, які дозволяють розширити функціональність апаратів та підвищити їх ефективність у складних умовах експлуатації.

### **1.7 Методи вимірювання прискорення сили тяжіння**

Методи вимірювання прискорення сили тяжіння поділяються на *статичні* та *динамічні*. У статичних визначають зміни деформації пружного елемента під дією навантаження, тоді як динамічні базуються на аналізі руху маси у полі сили тяжіння. Ці підходи поділяються на *абсолютні*, які вимірюють точне значення сили тяжіння у конкретній точці (наприклад, шлях вільного падіння з урахуванням часу та відстані), і *відносні*, що визначають відхилення величини сили тяжіння порівняно з контрольним значенням. Динамічні методи можуть бути як абсолютними, так і відносними, тоді як статичні залишаються виключно відносними.

Таблиця 1.3 – Методи вимірювання

Метод	Принцип вимірювання
Балістичний метод	шлях вільного падіння тіла використовується для обчислення величини прискорення
Маятниковий метод	базується на співвідношенні між періодом коливань маятника сталої довжини та значенням сили тяжіння
Струнний метод	частота коливань струни з вантажем на кінці дозволяє визначити величину $g$
Пружинний метод	зміна рівноважного положення пружини або крутильної нитки використовується для обчислення величини додаткової деформації, яка виникає при зміні сили тяжіння.

На рис.1.7 зображено принцип роботи гравіметра

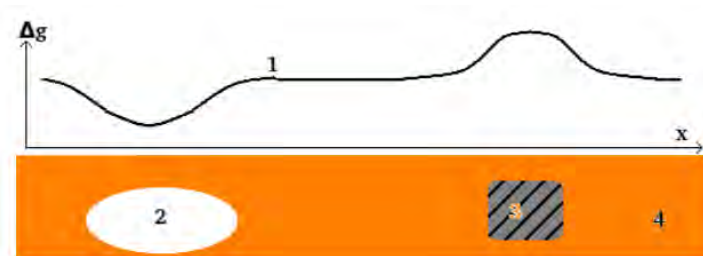


Рисунок 1.7 – Принцип дії гравіметра, 1 – значення  $g$ , 2 – пустота або печера, 3 – поклад важких металів, 4 – поверхня



Таблиця 1.4 – Класифікація гравіметрів

Тип гравіметра	Класифікація
Перший тип	маса рухається лінійно вздовж осі
Другий тип	маса здійснює обертальний рух навколо точки підвісу

Сила тяжіння визначається як векторна величина, що має значення та напрямок, заданий чутливою віссю приладу. Метод реєстрації цієї сили залежить від фізичних принципів, покладених в основу конкретного гравіметра.

## 1.8 Огляд чутливих елементів та принцип дії

### 1.8.1 Струнний гравіметр

Дія струнних гравіметрів [12,13] базується на фізичній властивості струни змінювати частоту своїх коливань залежно від зовнішніх сил. Простіше кажучи, частота коливань струни залежить від прискорення сили тяжіння. Як приклад можна навести струнний гравіметр, розроблений ВНДІ Геофізики під керівництвом Лозинської А.М. [12].

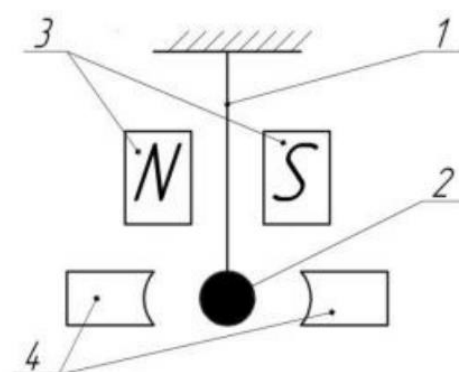


Рисунок 1.8 – Струнний гравіметр [12,13]

На рисунку 1.8 [12,13] зображена загальна конструкція струнного гравіметра. Струна (1) закріплюється між полюсами постійного магніту (3) і тримає на собі масу (2). Під дією гравітації на масу діє сила  $mg$ , яка викликає коливання струни з певною частотою. Використання рідинного демпфування в цьому приладі спричиняє низку недоліків. Систематичні похибки, резонанс окремих деталей під час вібрацій, а також зростання динамічного температурного коефіцієнта, пов'язане з вертикальною конвекцією рідинних потоків. Простий варіант струнного гравіметра демонструє нелінійну характеристику та недостатню точність, що зазвичай становить 5–8 мГал.

Для забезпечення незатухаючих коливань струни до неї подається змінна напруга. У результаті частота цих коливань може бути визначена шляхом порівняння її з частотою еталонного генератора.

Таблиця 1.5 – Переваги та недоліки струнного гравіметра [12,13]

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- вихідний сигнал має частотну форму, що спрощує обробку;</li> <li>- висока чутливість приладу;</li> <li>- невеликий час реагування;</li> <li>- значний діапазон вимірювань</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- нелінійність вихідних характеристик у спрощених конструкціях;</li> <li>- можливість систематичних похибок;</li> <li>- резонансні явища у конструктивних елементах під впливом вібрацій, що спотворюють результати вимірювання;</li> <li>- підвищений динамічний температурний коефіцієнт через вплив конвекційних потоків</li> </ul>

## 1.8.2 П'єзоелектричний гравіметр

У п'єзоелектричних пристроях використовуються кристали [12], які здатні демонструвати п'єзофенект у двох формах: прямиї і зворотної. Прямий п'єзофенект полягає у виникненні електричного заряду на поверхнях п'єзоматеріалу під час його механічної деформації. Залежно від типу деформації (розтяг чи стиснення), заряд змінює свій знак на протилежний. Зворотний п'єзофенект спостерігається, коли п'єзопластина перебуває в електричному полі: її розміри змінюються відповідно до зміни параметрів поля.

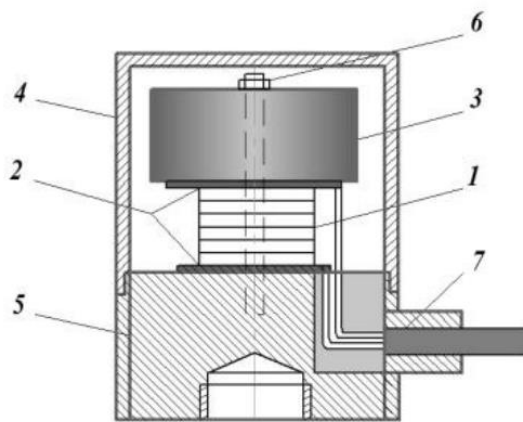


Рисунок 1.9 – П'єзоелектричний гравіметр [12,15]

На кафедрі приладобудування «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом [12] Безвесільної О.М. було створено та досліджено п'єзоелектричний гравіметр, конструкція якого наведена на рис. 1.9. Основним чутливим елементом пристрою є п'єзопакет (1), що складається з кількох шарів ніобату літію. Ізолятори (2) розташовані на кінцях п'єзопакета, а маса (3) служить інерційним елементом. Для забезпечення міцності та стабільності конструкції чутливий елемент закріплений до основи (4) за допомогою фіксуючого гвинта (6). Сигнальний кабель (7) використовується для передачі сигналу до операційного підсилювача [15].

Таблиця 1.6 – Переваги та недоліки п’єзоелектричного гравіметра [12,15]

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- компактні розміри і невелика маса.</li> <li>- вихідний сигнал зручний для подальшої обробки.</li> <li>- висока чутливість і короткий час реакції.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- у спрощеній конструкції пристрій придатний лише для вимірювання швидкоплинних процесів</li> </ul>

### 1.8.3 Гіроскопічний гравіметр

Гіроскопічний гравіметр складається з гіроскопічної пластини та маятника, прикріпленого до осьового підвісу, який розташований перпендикулярно до осі обертання гіроскопа. Основною задачею такого приладу є точне встановлення осі чутливості гравіметра відносно земної поверхні.

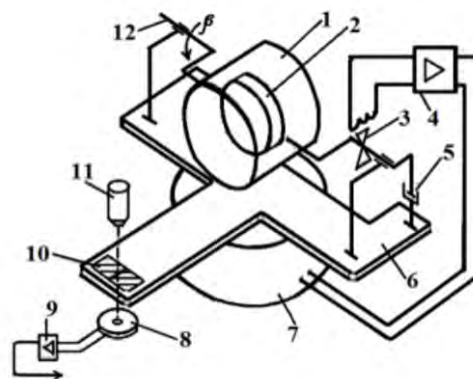


Рисунок 1.10 – Гіроскопічний гравіметр [10,12].

На кафедрі приладобудування «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом Безвесільної О.М. [12] було розроблено та досліджено гіроскопічний гравіметр, заснований на принципі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень (ГІЛП). Його схема представлена на рис. 1.10.

Основними елементами гіроскопічного гравіметра є гіромотор (1) із берилієвим ротором (2). Для забезпечення маятникового руху ротор датчика кута повороту (3) прикріплено до осі внутрішнього підвісу (12). Зовнішню рамку конструкції формує поворотна платформа (6), на якій закріплено підшипникові вузли для фіксації осі внутрішнього підвісу. У системі також використовується рідинний демпфер (5) для гасіння кутових коливань. Датчик моменту (7) відповідає за вимірювання кута повороту і отримує посилений сигнал від датчика (3). Вихідний сигнал формується, коли світловий промінь проходить через щілину у світлонепроникній мембрані (10) і потрапляє на фотоприймач (8). Цей сигнал подається до блоку електронних лічильників через підсилювач (9). Для захисту приладу використовується алюмінієвий корпус, що забезпечує додатковий магнітний захист [10,12].

Таблиця 1.7 – Переваги та недоліки гіроскопічного гравіметра [10,12]

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Стабільність показників завдяки сталій частоті живлення, яка забезпечує постійність кінетичного моменту ротора.</li> <li>- Менша залежність від параметрів, що впливають на стабільність роботи інших типів гравіметрів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складність конструкції та необхідність у точному калібруванні осі чутливості.</li> <li>- Висока чутливість до збурюючих моментів, які виникають під час обертання гіроскопа навколо осі зовнішньої рамки.</li> <li>- Додаткові вимоги до пристроїв, які вимірюють кутову швидкість, зокрема їхній невеликий розмір, низький поріг чутливості та великий діапазон вимірюваних швидкостей. Це ускладнює конструкцію, підвищує вартість і знижує надійність.</li> <li>- Вимога високої точності стабілізації осі чутливості для визначення істинної гравітаційної вертикалі</li> </ul>

Дослідження, проведені в США та Україні (зокрема НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" під керівництвом Безвесільної О.М.), підтвердили перспективність використання гіроскопічних інтеграторів лінійних прискорень (ГІЛП) у порівнянні з іншими типами гравіметрів для автоматизованих гравіметричних систем (АГС) [14]. Однак точність гіроскопічних приладів обмежується до 3 мГал через вищезгадані недоліки.

#### 1.8.4 Балістичний лазерний гравіметр

Балістичний лазерний гравіметр із двовимірним відеозображенням є складним пристроєм, що поєднує різні технології. Його функціонал дозволяє проводити вимірювання прискорення сили тяжіння, що робить цей прилад перспективним для використання у системах.

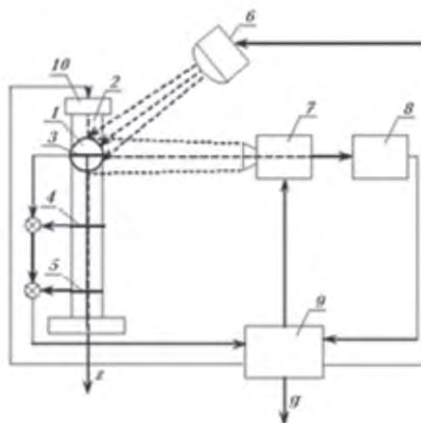


Рисунок 1.11 – Балістичний лазерний гравіметр [15]

Балістичні гравіметри характеризуються високою точністю вимірювань, проте обмежена швидкодія створює потребу в їх модернізації. Автоматизація та подальші розробки можуть значно покращити їхню ефективність і розширити спектр застосувань. У конструкції гравіметра пробне тіло (1) утримується за допомогою електромагніта (10). Сигнал, що надходить із цифрового ЕОМ (9),

активує електромагніт, після чого пробне тіло відпускається та починає рухатися вниз під дією сили тяжіння через прозору трубку (2). Оскільки тіло має магнітні властивості, його проходження через котушки (3–5) генерує електрорушійну силу (ЕРС). Імпульси напруги, отримані від котушок, надходять до цифрового ЕОМ (9), який фіксує моменти їх виникнення. Час між імпульсами залежить від прискорення сили тяжіння та відстаней між котушками.

Другий канал системи дозволяє визначити абсолютне значення прискорення сили тяжіння. Для цього цифровий ЕОМ (9) керує імпульсним джерелом освітлення (6) і відеокамерою (7). Камера записує рух пробного тіла в трубці (2), а також зображення електромагніта (10) і самого тіла (1). Спеціальний обчислювальний пристрій (8) аналізує координати центру мас пробного тіла, що визначаються в момент освітлення. Усі отримані дані обробляються цифровим ЕОМ (9), який формує кінцеві результати [15].

Таблиця 1.8 – Переваги та недоліки балістичного лазерного гравіметра

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Стабільна робота завдяки постійним параметрам живлення</li> <li>- Незалежність від зовнішніх умов</li> <li>- Можливість автоматизації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складна конструкція</li> <li>- Чутливість до зовнішніх впливів</li> <li>- Високі вимоги до додаткових компонентів</li> <li>- Необхідність стабілізації</li> <li>- Висока вартість та обмежена швидкодія</li> </ul>

### 1.8.5 Ємнісний гравіметр

Ємнісні гравіметри (ЄГ) є одними з найбільш перспективних компонентів для автоматизованих гравіметричних систем. =

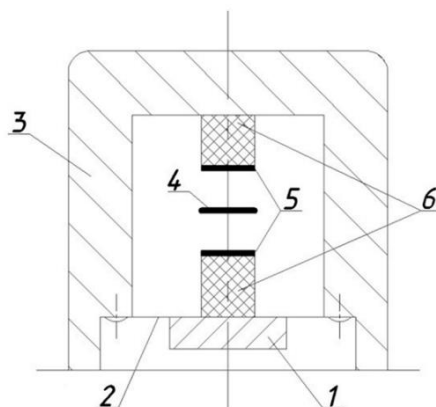


Рис. 1.12 – схема ємнісного гравіметра [12].

Основними елементами пристрою є дві металеві пластини, між якими знаходиться діелектрик. Нижня пластина закріплена на мембрані з прикріпленою до неї інерційною масою, а верхня пластина розташована в герметичному корпусі. Дія сили тяжіння змушує мембрану деформуватися, змінюючи відстань між пластинами. Це, своєю чергою, змінює ємність конденсатора, яка залежить від величини прискорення сили тяжіння  $gz$ .

Чутливий елемент гравіметра спеціально налаштований так, щоб його власна частота коливань відповідала максимальній частоті гравітаційних збурень, які можна зафіксувати за умов наявності шуму. Завдяки цій властивості елемент виконує також роль низькочастотного фільтра.



Таблиця 1.9 – Переваги та недоліки ємнісного гравіметра

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- лінійність вихідної характеристики.</li> <li>- компактність і невелика вага.</li> <li>- висока чутливість і стійкість показань</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька потужність вихідного сигналу.</li> <li>- високий рівень шумів.</li> <li>- наявність залишкових похибок</li> </ul>

Незважаючи на певні обмеження, ємнісні гравіметри демонструють значний потенціал для використання в автоматизованих системах. Подальше вдосконалення їхньої конструкції та обробки сигналів може суттєво розширити сферу їхнього застосування.

### Висновок до розділу 1

Провели огляд основних сфер застосування безпілотних літальних апаратів та опис класифікацій. Розглянули функціональні можливості до виконання певних завдань. Огляд сучасного безпілота на прикладі PD2 . Розглянули основні навігаційні системи на безпілотах. Розглянули принципи стабілізації та навігації безпілотованих літальних апаратів. Підключення різних чутливих елементів та сенсорів відкриває нові можливості для виконання завдань. Розглянуто різні методи вимірювання прискорення сили тяжіння, а також проведено детальний аналіз гравіметрів, що включає опис їхнього принципу дії, переваг і недоліків. До кожного з гравіметрів додано схему, яка ілюструє їхню конструкцію та принцип роботи. Попри певні недоліки перспективним залишаються ємнісні чутливі елементи у вимірювальних системах.

## Мета та актуальність обраної теми

Метою роботи є дослідження використання та пошук шляхів розвитку і вдосконалення ємнісних чутливих елементів, які використовуються у вимірювальних блоках систем, а також за своєю чутливістю здатні працювати як гравіметри. Це дослідження виконується з огляду на вдосконалення ємнісних чутливих елементів, вимірювання точних значень прискорення та застосування у автоматизованих систем керування та стабілізації безпілотних літальних апаратів при проведенні гравіметричних досліджень та інших комерційних цілях, де високі вимоги до точності.

Основним задачами дисертації:

- вступ (актуальність використання у автоматизованих системах, застосування елементів у системах стабілізації та систем вимірювання, практична цінність, новизна);
- огляд чутливих елементів для вимірювання прискорення сили тяжіння, принцип дії кожного гравіметра;
- огляд ємнісного чутливого елемента, принцип дії, конструкція елементів, перетворення сигналу, розрахунок параметрів чутливого елемента;
- математична модель, підвищення точності двоканальною конструкцією чутливого елемента;
- рівняння руху у складі АГС;
- функціональна схема АГС;
- принципова схема стабілізації АГС;
- принципова схема інерціальної навігаційної системи АГС;
- структурна схема перетворення сигналу двоканального ЄЧЕ;
- аналіз похибок чутливого елемента, похибки зміщення нуля пункту; методи, підвищення точності вимірювання;
- АГС з використанням нейромережі;

- трикоординатний чутливий елемент з двоканальною конструкцією уf кожній осі;
- дослідження стійкості системи за критеріями;
- експериментальні дослідження чутливого елементу на лабораторній установці та дослідження на ЕОМ;
- розробка стартап-проєкту про використання таких чутливих елементів в системах стабілізації на безпілотах;
- загальні висновки.

## **РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ МЕМС ЄЧЕ. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РІВНЯННЯ РУХУ У СКЛАДІ АГС. СИСТЕМА ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ДЛЯ АГС. СТРУКТУРНА СХЕМА ЄЧЕ**

### **2.1 Принцип дії ємнісного ЧЕ**

Принцип дії базується на зміні ємності сенсора, яка відбувається внаслідок переміщення інерційної маси під впливом прискорення. При цьому змінюється відстань між електродами  $d$ , що призводить до зміни ємності конденсатора. Ця зміна перетворюється сенсором у вихідний електричний сигнал – у формі заряду, напруги або струму.

Конструкція чутливого елемента включає два нерухомі електроди, між якими переміщується пластина з інерційною масою. Ця пластина виконує роль спільного електрода, утворюючи ємнісний півміст.

### **2.2 Конструкція МЕМС ЄЧЕ**

Конструкція [10] двоканального ємнісного гравіметра базується на використанні зустрічно-штирьового розташування електродів, що підвищує точність і функціональність пристрою. Інерційна маса кріпиться до кристала через пружні підвіси, які забезпечують амортизацію та гнучкість руху. Рухомі електроди інтегровані на інерційну масу, а нерухомі розташовані симетрично по обидва боки, що сприяє зменшенню впливу шумів і похибок, а також підвищенню чутливості та стабільності.

Для забезпечення більшої точності та формування потужнішого вихідного сигналу на відміну від одноканальних гравіметрів, використовується інтеграція кількох однакових ємнісних перетворювачів на одній МЕМС-пластині. Це

дозволяє зчитувати сигнали паралельно, ефективно компенсуючи шуми та підвищуючи стабільність і точність вимірювань.

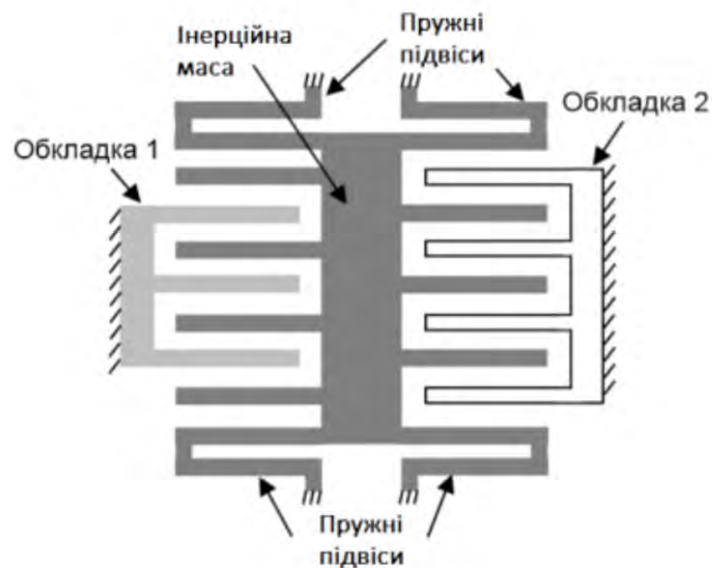


Рисунок 2.1 – Конструкція ємнісного диференційного чутливого елемента із зустрічно-штирьовим розташуванням електродів пластин [25].

Двоканальність конструкції реалізується шляхом встановлення двох симетричних МЕМС-пластин з однаковими характеристиками. Об'єднані сигнали від обох пластин надходять до суматора, де відбувається їх обробка та підсилення. Це дає змогу зменшити вплив зовнішніх факторів, забезпечити високу лінійність вихідного сигналу, мінімізувати похибки та підвищити надійність системи. Завдяки цим перевагам двоканальний гравіметр демонструє високоточні результати навіть у складних умовах, що робить його придатним для вимірювань гравітаційних полів із високою точністю.

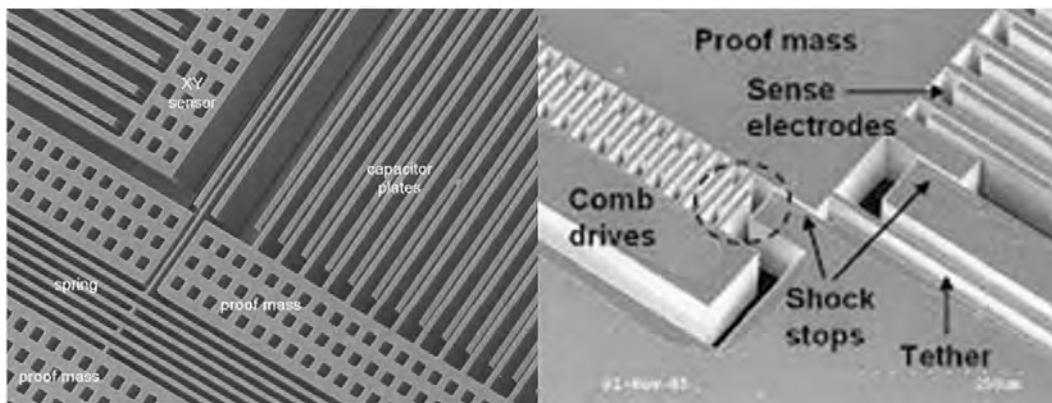


Рисунок 2.2 – Внутрішня будова обкладинок та пружних підвісів ємнісного МЕМС чутливого елемента

На рис. 2.2 зображена спрощена схема перетворювача, в якому інерційна маса кріпиться до основи за допомогою торсіонів і утворює диференціальні ємнісні осередки разом із нерухомими електродами. У стані спокою ємності двох конденсаторів рівні, тому вихідний сигнал відсутній. Під впливом прискорення інерційна маса зміщується, викликаючи зміну ємностей і появу вихідного сигналу, амплітуда якого пропорційна величині прикладеного впливу.

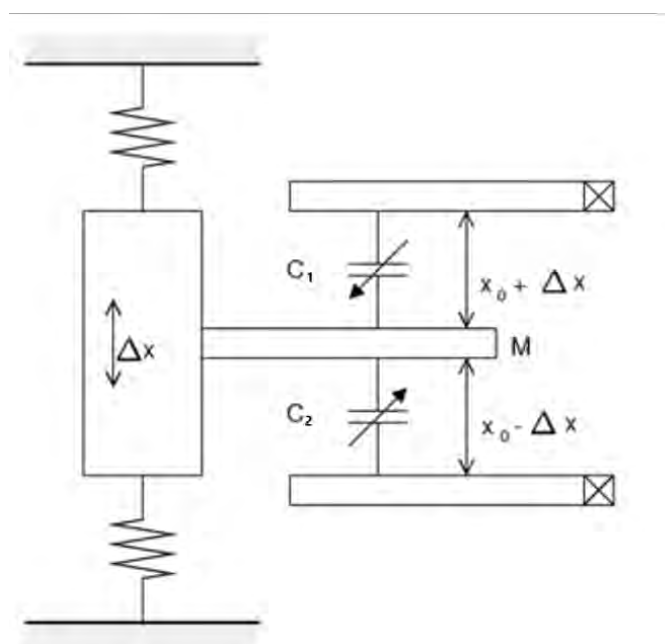


Рисунок 2.3 – Схема перетворення у стані спокою

Інерційні маси чутливих елементів фіксуються на основі за допомогою пружних підвісів, які можуть бути прямими або складчастими (Рис. 2.3). Для простих підвісів коефіцієнт пружності визначається аналітичними методами, тоді як для складчастих застосовуються чисельні підходи, такі як метод кінцевих елементів. Розрахунок коефіцієнта пружності для складчастого підвісу описується формулою [10,25]:

$$K = \frac{12EI}{(2N + 3)l^3} = \frac{Etw^3}{(2N + 3)l^3}, \quad (2.1)$$

де:

$E$  – модуль пружності матеріалу;

$I$  – момент інерції перерізу підвісу;

$w$  та  $t$  – ширина та товщина підвісу;

$N$  – кількість складок;

$l$  – довжина секції підвісу [10].

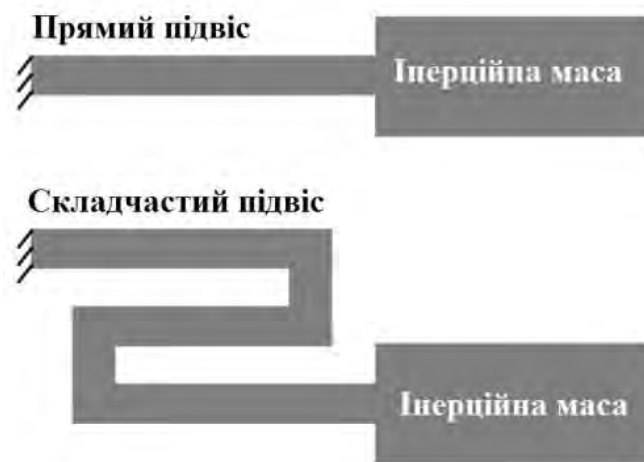


Рисунок 2.4 – Типи пружних підвісів [10,25].

Найбільші механічні напруги зосереджуються у зонах із мінімальними радіусами кривизни, таких як гострі кути або місця кріплення до рами. У цих областях можливе накопичення дефектів через порушення атомних зв'язків, що зменшує міцність і довговічність конструкції. Щоб мінімізувати ці проблеми, рекомендується використовувати вакуумне середовище із низьким тиском, що знижує ризик пошкодження матеріалу.

Втрати енергії в коливаннях виникають через внутрішнє тертя в матеріалі підвісу, що негативно впливає на добротність і точність роботи гравіметра. Для підвищення надійності та ресурсу рекомендується збільшити радіуси кривизни грані підвісу до 100 мкм. Експериментальні дослідження підтверджують, що такі конструктивні модифікації дозволяють збільшити добротність до 105 і підвищити точність вимірювань у середньому на 1,5 рази, що значно покращує ефективність роботи гравіметра [10,25].

### 2.3 Основні параметри ЧЕ

Власна частота коливань:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса,

$K$  – коефіцієнт пружності підвісу;

Абсолютний коефіцієнт демпфування  $b$  та відносний коефіцієнт демпфування  $\xi$  обчислюються за такими формулами: [25]:

$$b = n\mu \cdot \frac{h^3 l}{d^3}, \quad (2.3)$$



$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}, \quad (2.4)$$

$n$  — кількість пар зубців зустрічно-штирбового конденсатора;

$\mu$  — в'язкість повітря;

$l$  — довжина зубця;

$h$  — висота зубця;

$d$  — відстань між пластинами;

$M$  — маса рухомої обкладки.

Напруга притягання, при якій рухома обкладка починає притягуватись до нерухомої, обчислюється за формулою:

$$U_0 = \sqrt{\frac{8d^3k}{27\varepsilon_0S}}, \quad (2.5)$$

$\varepsilon_0$  — діелектрична проникність вакууму;

$S$  — площа рухомої обкладки;

$k$  — коефіцієнт пружності підвісу;

$d$  — відстань між пластинами.

## 2.4 Рівняння руху ЧЕ в умовах установки на Землі

Коливальна система ємнісного гравіметра, схематично представлена на рис. 2.5, складається з інерційної маси (ІМ), демпфуючого компонента (ДЕ) і пружного елемента з коефіцієнтом жорсткості  $k$ . У цьому пристрої роль демпфера виконує

повітря, яке чинить опір руху інерційної маси. ІМ рухається вздовж осі  $0-z$ , розташованої перпендикулярно до площини гнучкого з'єднання.

Для спрощення аналізу передбачається, що система не піддається демпфуванню, тобто відсутні будь-які сили, що пригнічують коливання. Маса пружного елемента настільки мала порівняно з масою ІМ, що її вплив на коливальний рух можна ігнорувати. Пружний елемент діє пропорційно до величини своєї деформації. Чим більший вигин, тим сильніше зростає сила, що повертає інерційну масу в початкове положення.

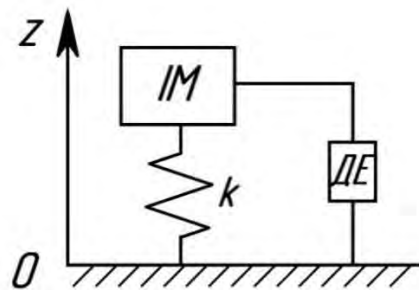


Рисунок 2.5 – Коливальна система ЄГ

Ця модель слугує основою для аналізу динамічної поведінки інерційної маси, враховуючи взаємодію компонентів системи під дією сили тяжіння.

Під час руху ІМ на неї діють такі сили: інерційна сила  $F_i$ , сила опору  $F_{op}$  і сила пружності  $F_{np}$ :

$$F_i = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2.6)$$

$$F_i = -n \frac{dx}{dt}, \quad (2.7)$$

$$F_{np} = -kx, \quad (2.8)$$

де  $n$  — коефіцієнт демпфування,

$k$  — коефіцієнт жорсткості пружного елемента,

$x$  — зміщення ІМ відносно положення рівноваги ЄЧЕ.

Відповідно до другого закону Ньютона, сила, яка забезпечує рух ІМ з прискоренням  $g_z$  має вигляд:

$$G = mg_z, \quad (2.9)$$

де,  $G$  – сила, що діє на ІМ;

$m$  – маса

З урахуванням рівнянь (2.6) – (2.9), рівняння руху двоканально ЄЧЕ набуває вигляду:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + kx = -mg_z, \quad (2.10)$$

Оскільки конструкція ЄЧЕ має високу інерційність, вплив перших двох складових рівняння можна знехтувати, що дозволяє спростити рівняння:

$$kx = -mg_z, \quad (2.11)$$

Для одноканального ЄЧЕ рівняння руху має вигляд [8]:

$$g_z = -\frac{k}{m}x, \quad (2.12)$$

Вихідна напруга  $u_1$  є пропорційною зміщенню інерційної маси  $x$ , тому електричний сигнал одноканального ЄЧЕ визначається:

$$u_1 = k(mg_z), \quad (2.13)$$

У двоканальній конструкції ЄЧЕ на обидва елементи діє однакове прискорення  $g_z$ , тому вихідні сигнали кожного каналу мають вигляд:

$$u_1 = k(mg_z), \quad (2.14)$$

$$u_2 = k(mg_z), \quad (2.15)$$

Сигнали  $u_1, u_2$ , що відповідають першому та другому каналу, додаються в суматорі, утворюючи загальний вихідний сигнал:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2 \cdot kmg_z, \quad (2.16)$$

де  $u_\Sigma$  – вихідний сигнал підсилювача, ,

З врахуванням рівняння (2.16), для двоканального ЄЧЕ рівняння руху на Землі записується:

$$kx = -2mg_z, \quad (2.17)$$

Таким чином, отримано рівняння, яке описує рух двоканального ЄЧЕ на Землі.

## 2.5 Двоканальна схема ЄЧЕ

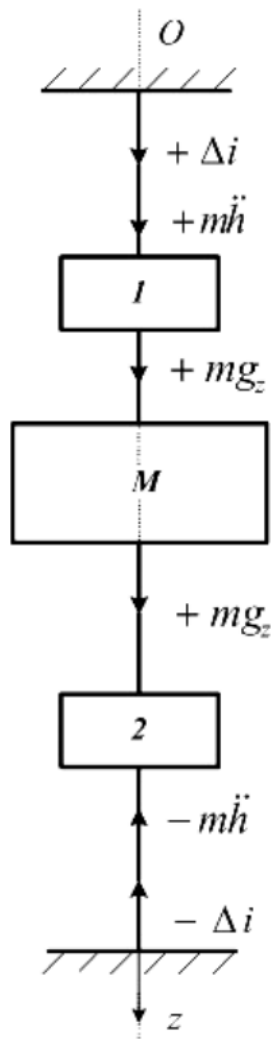


Рисунок 2.6 – Схема побудови двоканального ЄЧЕ: 1,2 – чутливі елементи двоканального гравіметра, М – інерційна маса [26].

## 2.6 Рівняння руху у складі АГС

Рівняння руху у складі АГС з одним чутливим елементом:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi + 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi - 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (2.18)$$

$f_z$  — вихідний сигнал двоканального ЄЧЕ,  $g_z$  — прискорення сили тяжіння вздовж осі ДЄГ, а всі інші компоненти в рівнянні є завадами [1].

Перетворення рівняння до виду знаходження прискорення:

$$g_z = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (2.19)$$

Аномалія ПСТ вздовж осі чутливості двоканального ЄЧЕ:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi - \ddot{h} - \Delta_3 + \gamma_0, \quad (2.20)$$

Двоканальний ЄЧЕ виконує роль фільтра у навігаційному комплексі та компенсує вплив вертикального прискорення  $\ddot{h}$ .

Спростимо рівняння до більш зручного вигляду:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0 + \Delta_3, \quad (2.21)$$

де  $f_z$  — вихідний сигнал двоканального ЄЧЕ;

$E$  — поправка Етвеша:

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi \quad (2.22)$$

$A$  – поправка висоти:

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cdot \cos^2 \varphi, \quad (2.23)$$

$\gamma_0$  – довідкове значення ПСТ (формула Кассініса) [27]:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \cdot \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi), \quad (2.24)$$

$\gamma_{0e}$  – довідкове значення ПСТ (екваторіальне):

$$\gamma_{0e} = 9,78049 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$$

$\Delta_3$  – похибка від впливу кутової швидкості обертання Землі

$$\Delta_3 = K_{\text{ер}} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \right), \quad (2.25)$$

де  $\lambda$  – довгота,

$\varphi$  – широта,

$\bar{\varphi}$  – середнє значення широти [27].

## 2.7 Функціональна схема АГС

Автоматизована гравіметрична система включає кілька підсистем: гравіметр для вимірювання прискорення сили тяжіння, гіростабілізована платформа для стабілізації осі двоканально ЄЧЕ у вертикальному положенні, ІНС для визначення навігаційних параметрів, вимірювач висоти та БЦОМ.

Функціональну схему авіаційної гравіметричної системи зображено на рис. 2.7

*Надається за запитом до авторів*

Рисунок 2.7 – АГС для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння [26].

Рівняння для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння:

$$\Delta g = f_z + E + A - h - \gamma_0, \quad (2.26)$$

## 2.8 АГС з використання двоканального ЄЧЕ

*Надається за запитом до авторів*

Рисунок 2.8 – Двоканальний ємнісний гравіметр у складі АГС [10,24]



1 – двоканальний ємнісний гравіметр, 2 – система визначення поточних навігаційних параметрів, 3 – вимірювач поточної висоти, 4 – БЦОМ, 5,6 – ємнісні чутливі елементи, 7–8 рухомі і нерухомі пластини, 9 – суматор, 10 – підсилювач, 11 – цифровий модуль, 12 – екрановані коаксіальні кабелі, 13 – захисне кільце, 14 – діелектрики [1,10,24].

## 2.9 Принципова схема стабілізації АГС

Система стабілізації авіаційної гравіметричної системи призначена для забезпечення точного вирівнювання вимірювальної осі ємнісного гравіметра з вертикаллю. Для цього чутливий елемент встановлюється на горизонтальну стабілізовану платформу, яка складається з двох лінійних акселерометрів та виконавчих механізмів, реалізованих у вигляді спеціалізованих двигунів [7]. Гіростабілізована платформа орієнтована в межах географічної системи координат, осі чутливості акселерометрів спрямовані на північ та схід.

*Надається за запитом до авторів*

Рисунок 2.9 – Принципова схема системи стабілізації АГС [9,10].

Вихідні сигнали акселерометрів  $f_y$  та  $f_x$  набувають вигляду [9]:

$$f_x = -(2\dot{r}\dot{\varphi}_c + r\ddot{\varphi}_c)\cos\chi + (\ddot{r} - r\dot{\varphi}_c^2)\sin\chi - 2r\omega_3\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi + \delta'g \quad (2.27)$$

$$f_y = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3\sin\varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda}\sin\varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_c - r\ddot{\lambda}\cos\varphi_c - 2\dot{r}\omega_3\cos\varphi_c - vg,$$

(2.28)

де  $\aleph$  – кут між нормаллями до еліпсоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана;  $\nu$  – кут між нормаллями до геоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана;  $\varphi$  – географічна широта;  $\varphi_c$  – геоцентрична широта;  $\chi$  – відхилення від вертикалі;  $\lambda$  – довгота місця.

Отримані сигнали передаються до блоку керування, який генерує відповідний сигнал для двигунів, які забезпечують вирівнювання гіростабілізованої платформи до нульового положення.

При встановленні ГСП рівним у положенні вертикалі, горизонтальні складові прискорення сили тяжіння дорівнюють нулю. Враховуючи, що  $g = -\nu g = 0$ , блок керування буде компенсувати наступні складові [10]:

$$f_x \rightarrow 0 = 2r\omega_3\lambda\cos\varphi_c\sin\varphi - r\lambda\cos\varphi_c\sin\varphi \quad (2.29)$$

$$f_y \rightarrow 0 = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3\sin\varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda}\sin\varphi_c - 2\dot{r}\lambda\cos\varphi_c - 2\dot{r}\omega_3\cos\varphi_c \quad (2.30)$$

Нехтуючи складовими другого порядку та прийнявши відхилення від вертикалі рівним нулю [10], отримуємо:

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c, \quad (2.31)$$

$$f_y = -2r\dot{\lambda}\cos\varphi_c, \quad (2.32)$$

Після виконання відповідних математичних операцій (множення на  $r^{-1}$ , інтегрування та зміни знаку) над сигналами  $f_x$  та  $f_y$ , на виході отримуємо значення  $\dot{\varphi}$  та  $\dot{\lambda}\cos\varphi_c$ . Сигнал  $\dot{\varphi}$  використовується для керування гіростабілізованою платформою відносно осі, спрямованої на північ (x), а сигнал  $\dot{\lambda}\cos\varphi_c$  для керування відносно осі, спрямованої на схід (y).

## 2.10 Принципова схема інерціальної навігаційної системи АГС

При проведенні гравіметричних досліджень системи інерціальної навігації повинні забезпечувати точне визначення положення і параметрів руху об'єкта. Для цього СІН використовують чутливі сенсори встановлені на гіростабілізованих платформах, які вимірюють кутові швидкості відносно північної та східної осей. Побудуємо блок схему інерціальної навігаційної системи (рис. 2.10). СІН повинні бути стійкими до вібрацій та інших впливів і забезпечувати стабільність і коректність роботи системи.

Чутливі елементи встановлені на ГСП вимірюють вихідні сигнали, які є кутовими швидкостями відносно північної та східної осей

$$\omega_x = -r\ddot{\varphi}_c, \quad (2.33)$$

$$\omega_y = -r\dot{\lambda}\cos\varphi_c, \quad (2.34)$$

Довготу  $\lambda$  визначаємо шляхом множення  $\omega_y$  на  $\sec\varphi$  та подальшого інтегрування, враховуючи задане початкове значення довготи. Широта  $\varphi$  обчислюється через інтегрування  $\omega_x$  з урахуванням початкового значення широти [7].

*Надається за запитом до авторів*

Рисунок 2.10 – Принципова схема інерціальної навігаційної системи АГС  
[9,10].

## 2.11 Принципова схема повної системи для визначення аномалій ПСТ

На рис.2.11 зображено принципову схему для визначення аномалій прискорень сили тяжіння, яка включає в себе систему стабілізації та навігації [9].

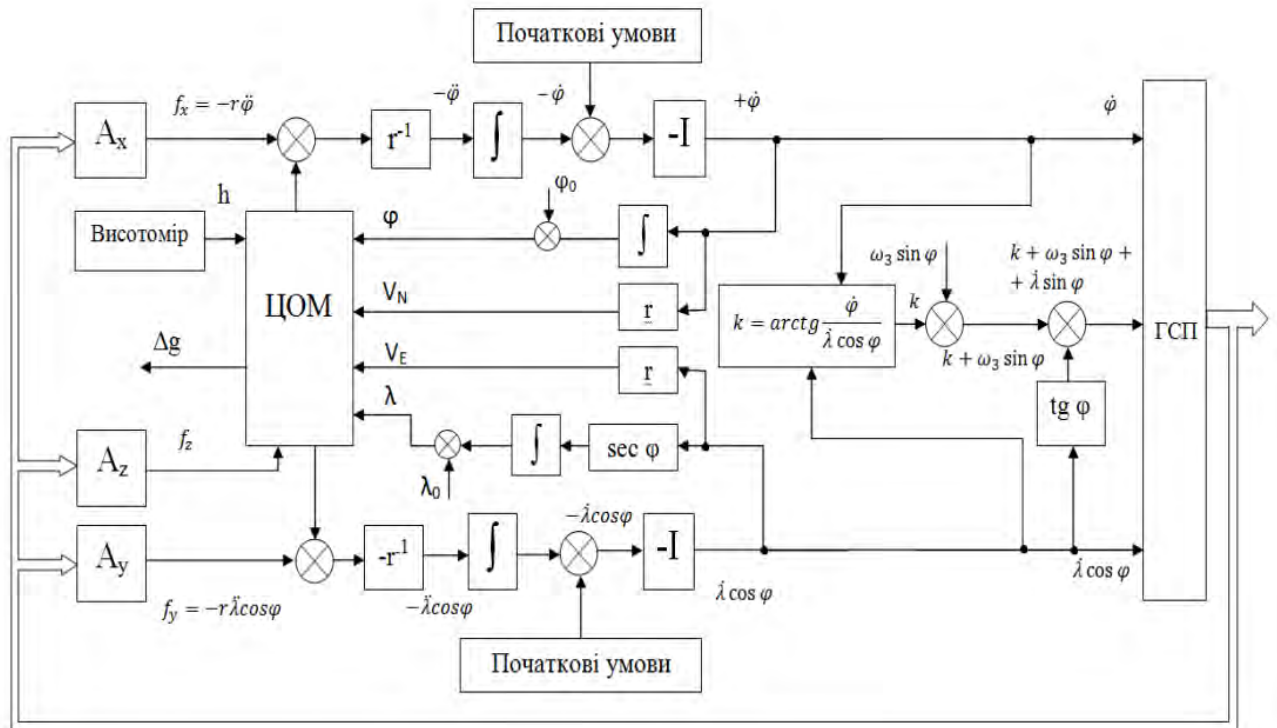


Рисунок 2.11 – Принципова схема повної для визначення аномалій ПСТ [9,10,13,26].

Загальне рівняння для розрахунку аномалії:

$$\Delta g = f_z + E + A - h - \gamma_0, \quad (2.35)$$

## 2.12 Структурна схема ЄЧЕ

Двоканальний ЄЧЕ виконує перетворення вхідного сигналу на вихідний, забезпечуючи високу точність вимірювань і ефективно компенсуючи похибки, такі як вертикальне прискорення БПЛА чи інструментальні похибки. У порівнянні з одноканальним гравіметром, двоканальна система має перевагу завдяки використанню двох паралельних каналів.

### 2.12.1 Структурна схема одноканального ЄЧЕ

Структурна схема одноканального ємнісного гравіметра зображена на рис.2.12

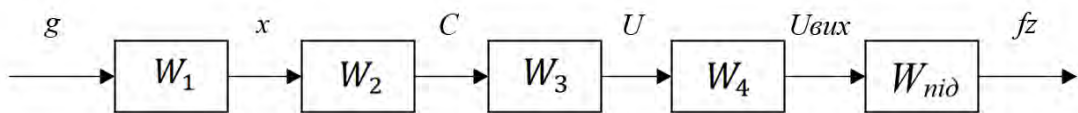


Рисунок 2.12 – Структурна схема ЄЧЕ

Ланка  $W_1$  описує зміну відстані між обкладинками конденсатора під впливом сили тяжіння  $g$ , яка діє на масу чутливого елемента. Взаємодія сили тяжіння і пружного елемента описується рівнянням  $G = 2F_{\text{пр}} = 2kx$ , де  $F_{\text{пр}}$  — сила пружності,  $x$  — зміщення.

$$W_1 = \frac{x}{g} = \frac{g}{2k} \cdot \frac{1}{g} = \frac{1}{2k}, \quad (2.36)$$

Ланка  $W_2$  відповідає за перетворення зміни відстані між обкладинками на зміну ємності  $C$  конденсатора.

$$W_2 = \frac{\Delta C}{x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot x}{d \cdot x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.37)$$

Де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність матеріалу;

$d$  = відстань між обкладинками.

$S$  - площа перекриття обкладинок;

$\varepsilon_0$  - діелектрична постійна [1];

Ланка  $W_3$  виконує перетворення змін ємності в зміну напруги на електродах чутливого елемента:

$$W_3 = \frac{\Delta U_{\text{сy}}}{\Delta C} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \Delta C}{C \cdot \Delta C} = \frac{U_{\text{вх}}}{C}, \quad (2.38)$$

Ланка  $W_4$  описує перетворення напруги на вихідний сигнал.

$$W_4 = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{сe}}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \cdot \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}, \quad (2.39)$$

Де коефіцієнт,  $\varepsilon_R = \frac{R_{\text{сe}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}$ ,

Постійна часу  $\tau = R_{\text{сe}} \cdot C_{\text{сe}}$

Передаточна характеристика операційного підсилювача позначається  $W_{\text{під}}$  Інерційна ланка першого порядку. Має затримку у відповідь на зміни вхідного сигналу [1].

$$W_{\text{під}} = \frac{K_{\text{оп}}}{1 + p\tau_{\text{оп}}}, \quad (2.40)$$

Де  $K_{OP}$  коефіцієнт підсилення ОП,

$\tau_{OP}$  постійна часу.

При функціонуванні у вузькому діапазоні частот, коефіцієнт ОП є майже рівним передатній ланці  $W_{під}$ :

$$W_5 = K_{OP}, \quad (2.41)$$

Загальний вираз передатної функції:

$$W = (W_{11} \cdot W_{12} \cdot W_{13} \cdot W_{14} \cdot W_{21} \cdot W_{22} \cdot W_{23} \cdot W_{24}) \cdot \frac{W_{під}}{1 + W_{під} \cdot W_5}, \quad (2.42)$$

### 2.12.2 Структурна схема двоканального ЄЧЕ

Структурна схема двоканального ЄЧЕ має перевагу порівняно з одноканальним тим, що усуває вплив вертикального прискорення ЛА та інструментальні похибки [1,10]. Структурну схему двоканального ЄЧЕ наведено на рис. 2.13.

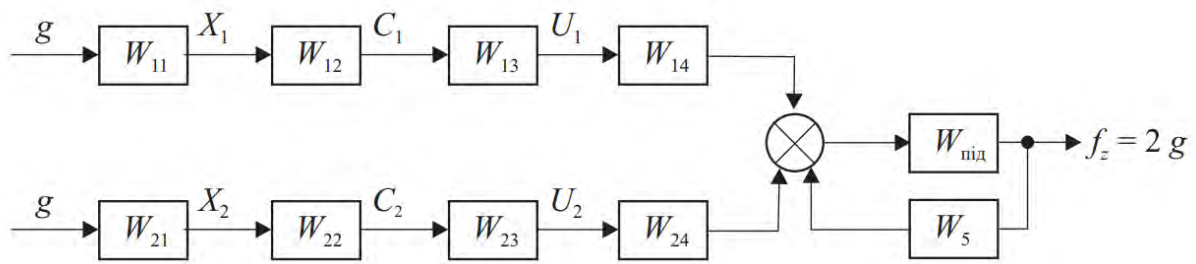


Рисунок 2.13 – Структурна схема двоканального ЄЧЕ

Ланка  $W_{11}, W_{21}$  описують зміну відстані між обкладинками конденсатора під впливом сили тяжіння  $g$ , Ланка  $W_{12}, W_{22}$  відповідають за перетворення зміни відстані між обкладинками на зміну ємності  $C$  конденсатора. Ланка  $W_{13}, W_{23}$  виконують перетворення змін ємності в зміну напруги на електродах чутливого елемента, ланки  $W_{14}, W_{24}$  описують перетворення напруги на вихідний сигнал. Передаточна характеристика операційного підсилювача позначається  $W_{\text{під}}$ . Ланка  $W_5$  виконує функцію фільтрації через зворотній зв'язок [1,10].

## Висновки до розділу 2

Досліджено принцип дії ємнісного чутливого елемента. Розглянуто конструкцію диференціального ЄЧЕ та основні параметри системи. Досліджено коливальну систему ємнісного гравіметра та побудовано математичну модель двоканального ємнісного чутливого елемента ЄЧЕ. Досліджено рівняння руху ЄЧЕ у складі АГС. Представлено функціональну схему АГС з використанням двоканального ЄЧЕ. Доведено, що двоканальна конструкція усуває вплив вертикального прискорення та інструментальних похибок. Побудовано принципову схему стабілізації для АГС та принципову схему інерціальної навігаційної системи для АГС. Побудували структурну схему з двоканальним ЄЧЕ. Побудовано повну принципову схему для визначення аномалій прискорення сили тяжіння.



## **РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПОХИБОК ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АГС З ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ. ТРИКООРДИНАТНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄЧЕ**

### **3.1 Аналіз похибок ДЄГ**

Для аналізу похибок, які можуть виникати у двоканального МЕМС гравіметра, їх класифікують наступним чином:

1) Залежно від зумовлюючих чинників:

а) Методичні — викликані недосконалістю методу вимірювання або невірно підбраною моделлю об'єкта вимірювання.

б) Інструментальні — зумовлені властивостями конкретного засобу вимірювання.

2) Залежно від характеру впливу:

а) Статичні.

б) Динамічні.

3) Залежно від повторюваності:

а) Випадкові — змінюються за знаком і величиною випадково при однакових вимірюваннях в однакових умовах.

б) Систематичні — постійні похибки при певних вимірюваннях [20, 21].

Інструментальні похибки одноканального МЕМС гравіметра визначаються [22,]:

- Порогом чутливості.
- Порушенням лінійності між вхідним і вихідним сигналами.
- Гістерезисом у пружних елементах.
- Температурною залежністю параметрів і характеристик гравіметра.

Перетворення  $g$  у вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$  визначається :

$$U_{\text{вих}} = \frac{d_{ij} \cdot m \cdot g_z}{C_{\text{EE}}}, \quad (2.34)$$

де  $U_{\text{вих}}$  — вихідна напруга,

$d_{ij}$  — модуль,

$g_z$  — ПСТ

$m$  — маса.

Прискорення сили тяжіння  $g_z$  обчислюється за формулою:

$$g_z = \frac{U_{\text{вих}} \cdot C_{\text{EE}}}{d_{ij} \cdot m}, \quad (2.35)$$

Відносна похибка  $g_z$  визначається як сума відносних похибок параметрів МЕМС ЄГ до їхніх ступеневих показників: [27].

$$\frac{\Delta g_z}{g_z} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} + \frac{\Delta C_{\text{EE}}}{C_{\text{EE}}} - \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\Delta m}{m}, \quad (2.36)$$

Матеріал чутливого елемента кремній. Температурна залежність модуля описується формулою: [30]:

$$\Delta d_{ij} = d_{ij} \cdot \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t, \quad (2.37)$$

$\Delta t$ - зміна часу,

$\alpha_{\text{стр}} = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , температурний коефіцієнт лінійного розширення.

$$\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} = \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t, \quad (2.38)$$

$$\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} = 0,59 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,59 \cdot 10^{-6}, \quad (2.39)$$

Похибка ємності  $C_{\text{EE}}$  визначається за формулою:

$$C_{\text{EE}} = \frac{\varepsilon \cdot S}{h_n}, \quad (2.40)$$

де,  $h_n$ - висота ЄГ,

$S$  – площа,

$\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу, в даному випадку кремнію,

Похибка  $\Delta\varepsilon$ :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-5}, \quad (2.41)$$

Похибка  $\Delta S$ :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{0,005 \cdot 10^{-8}}{2,3 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,0015 \cdot 10^{-8}}{2,3 \cdot 10^{-7}} = 0,65 \cdot 10^{-4}, \quad (2.42)$$

$S = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  – площа чутливого елемента.

$\Delta S = 0,0015 \cdot 10^{-8}$  – допуски по сторонам площі ємнісного МЕМС гравіметра.

Похибка для висоти  $\Delta h_n$  0,3 мкм[23]:

$$\frac{\Delta h_n}{h_n} = \frac{0,3 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,00006 = 0,6 \cdot 10^{-4}, \quad (2.43)$$

Сумарна похибка ємності [27]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{\text{EE}}}{C_{\text{EE}}} &= \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta h_n}{h_n} = \\ &= 1 \cdot 10^{-5} + 0,65 \cdot 10^{-4} - 0,6 \cdot 10^{-4} = 0,15 \cdot 10^{-4}, \end{aligned} \quad (2.44)$$

Відносна похибка густини: [23]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t = 0,59 \cdot 10^{-6} \cdot 1, \quad (2.45)$$

Відносна похибка зміни об'єму [23]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0,65 \cdot 10^{-4} + 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,25 \cdot 10^{-4}, \quad (2.46)$$

Відносна похибка маси [23]:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V}{V} = 0,59 \cdot 10^{-6} + 1,25 \cdot 10^{-4} = 1,84 \cdot 10^{-4}, \quad (2.47)$$

Врахуємо, що інструментальна похибка гравіметра не перевищує 0,1 мГал.

Відносна похибка вихідної напруги:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} &= \frac{\Delta g_z}{g_z} - \frac{\Delta C_{\text{EE}}}{C_{\text{EE}}} + \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} + \frac{\Delta m}{m} = \\ &= 0,01 \cdot 10^{-4} - 0,15 \cdot 10^{-4} + 0,59 \cdot 10^{-6} + 1,84 \cdot 10^{-4} = 1,7 \cdot 10^{-4}, \end{aligned} \quad (2.48)$$

Інструментальні похибки для двоканального МЕМС ЄГ [10,24]:

$$U_1 = k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i), \quad (2.49)$$

$$U_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i), \quad (2.50)$$

де  $U_1$  та  $U_2$  – вихідні електричні сигнали першого та другого каналів;

$m$  – вага ІМ;

$k$  – електрична стала [23].

Об'єднання сигналів  $U_1$  та  $U_2$  у двоканальному МЕМС гравіметрі дозволяє ефективно нейтралізувати вплив похибок, спричинених вертикальним прискоренням  $\Delta\ddot{i}$ , а також мінімізувати інструментальні похибки  $\Delta i$ , пов'язані з роботою чутливих елементів. Завдяки цьому підходу вихідний сигнал є більш точним і стабільним. У результаті точність вимірювань двоканального гравіметра значно перевищує точність одноканального аналога, забезпечуючи надійність результатів навіть за наявності зовнішніх впливів та шумів.

### 3.2 Похибка зумовлена зміщенням нуля пункту

Одним із головних недоліків гравіметрів є дрейф нульового пункту, що проявляється у повільному зміщенні вихідного сигналу навіть за незмінних умов (температура, тиск). Причиною цього є «втомлення» пружного елемента, який

поступово змінює деформацію під постійним навантаженням [10,28]. Значення дрейфу варіюється залежно від конструкції та матеріалів, зазвичай складаючи десяті частки мілігала.

### **3.2.1 Метод збільшення кількості вимірювань**

Цей метод передбачає виконання вимірювань у трьох положеннях осі чутливості відносно поля тяжіння: вздовж вектора тяжіння, у протилежному напрямку та перпендикулярно до нього. Однак такий підхід має обмеження через похибки, зумовлені різною жорсткістю підвісу, складнощами визначення нуля при горизонтальному та вертикальному положеннях осі чутливості, а також зміщеннями сигналу у різні моменти часу.

### **3.2.2 Метод програмної компенсації**

У цьому методі систематичні похибки дрейфу усуваються програмно шляхом видалення постійної складової сигналу. Така компенсація дозволяє значно знизити похибки без необхідності в складних апаратних рішеннях. Температурний дрейф, який становить не більше 0,2%, зазвичай не впливає на точність і не потребує додаткових корекцій.

### **3.2.3 Метод ускладнення конструкції**

Один із методів компенсації похибок дрейфу нуля передбачає ускладнення конструкції гравіметричної системи. Цей підхід використовується для вимірювання малих кутових швидкостей гіростабілізованої платформи (ГСП) і базується на фіксації та обробці вихідної інформації гравіметрів у кількох положеннях.

У цьому методі вісь чутливості гравіметрів спочатку орієнтують перпендикулярно до поля тяжіння. Потім вихідну інформацію фіксують під час вимірювання кутових швидкостей ГСП, після чого гравіметри розгортають на

180° навколо вектора поля тяжіння. Після розвороту дані знову зчитують, а кутову швидкість ГСП розраховують на основі результатів двох вимірювань.

Для реалізації цього методу використовується пристрій, представлений на рисунку 2.11.

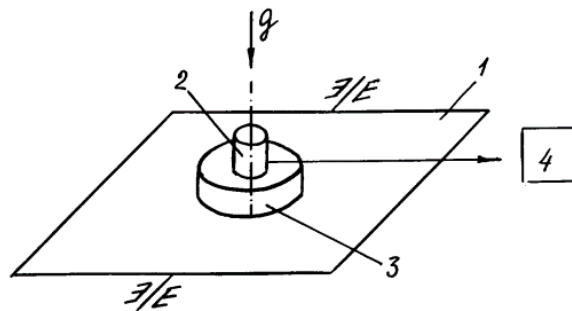


Рисунок 3.1 — ГСП, 2 — гравіметри, 3 — пристрій для розвороту гравіметра, 4 — обчислювальний пристрій [10].

Алгоритм вимірювання малих кутових швидкостей включає орієнтацію осі чутливості гравіметрів перпендикулярно до поля тяжіння за допомогою ГСП, фіксацію вихідних даних під час вимірювання, розворот гравіметрів на 180° навколо вектора тяжіння, повторну фіксацію даних після розвороту та обчислення кутової швидкості за двома вимірюваннями з використанням блоку керування [10].

Цей метод забезпечує високу точність вимірювання, знижує вимоги до адаптивної похибки гравіметра та усуває необхідність точної виставки осі чутливості МЕМС ЄГ, що робить його ефективним для експлуатації в складних умовах.

### 3.3 АГС з використанням нейромережі

У традиційних авіаційних гравіметричних системах (АГС) не передбачено механізмів компенсації похибок гравіметра (1), окрім та горизонтальних акселерометрів  $A_x$  (2) і  $A_y$  (3). Ці похибки, спричинені такими факторами, як систематичний дрейф, масштабування коефіцієнтів та орієнтація осей чутливості, значно знижують точність вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Запропонована система вдосконалення АГС включає в себе такі компоненти: гравіметр  $A_z$  (1), горизонтальні акселерометри  $A_x$  (2) і  $A_y$  (3), гіростабілізовану платформу (ГСП), вимірювач висоти (4), бортову цифрову обчислювальну машину (БЦОМ) (5) та блок нейронної мережі (6). Вихідні сигнали від гравіметра, акселерометрів і висотоміра передаються до БЦОМ, де дані обробляються для зменшення похибок та підвищення точності вимірювань (див. рис. 1).



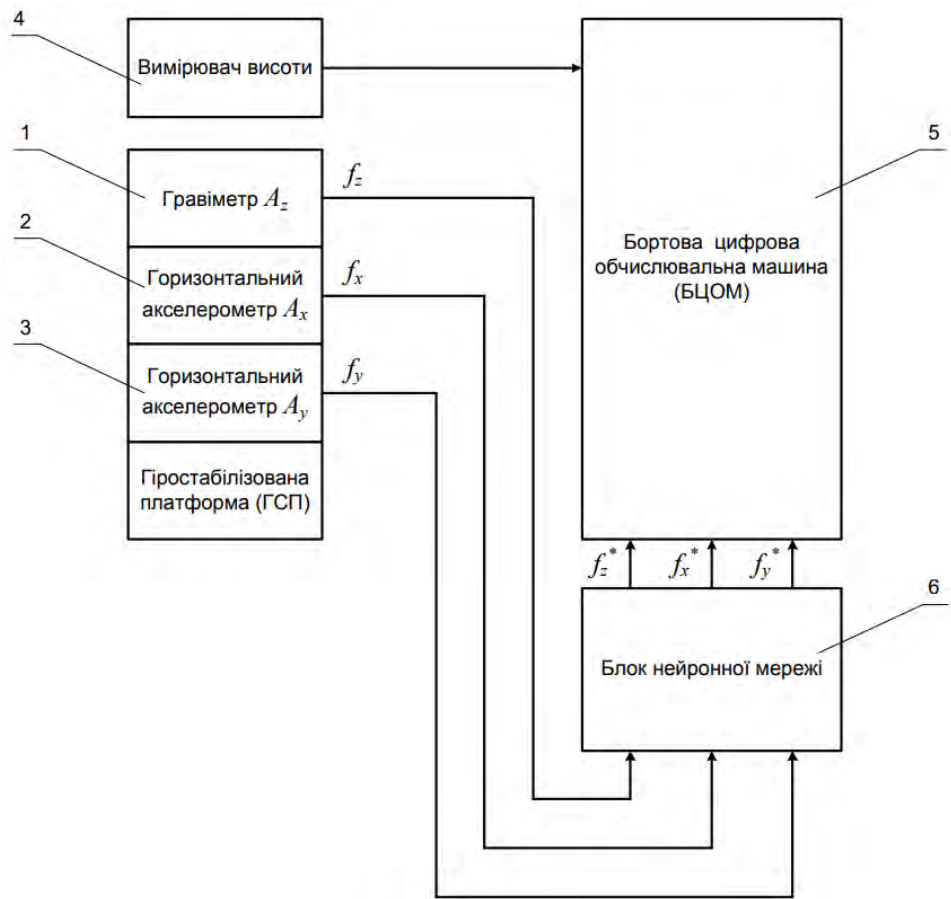


Рисунок 3.2 – Авіаційна гравіметрична система з використанням блоку нейронної мережі [29]

Блок нейронної мережі (6) виконує корекцію сигналів від гравіметра  $f_z$ , горизонтальних акселерометрів  $f_x$  і  $f_y$ , а скориговані результати  $f_z^*$ ,  $f_x^*$  і  $f_y^*$  подаються до БЦОМ (5) для подальшого аналізу. Таким чином, система забезпечує компенсацію інструментальних похибок і значно підвищує точність вимірювань навіть за умов зовнішніх впливів.

### 3.4 Трикоординатний двоканальний ЄЧЕ

Горизонтальні складові  $g_x$  та  $g_y$  зазвичай вважаються незначними, проте вони можуть суттєво впливати на результати вимірювань, особливо в умовах динамічних систем. Ігнорування їхнього впливу призводить до значних похибок у розрахунках, що суттєво знижує загальну точність гравіметричних вимірювань. У зв'язку з цим розробка трикоординатного ємнісного гравіметра стає актуальним напрямком, оскільки дозволяє одночасно враховувати всі компоненти прискорення та мінімізувати похибки під час експлуатації (рис. 2.12) [10,30].

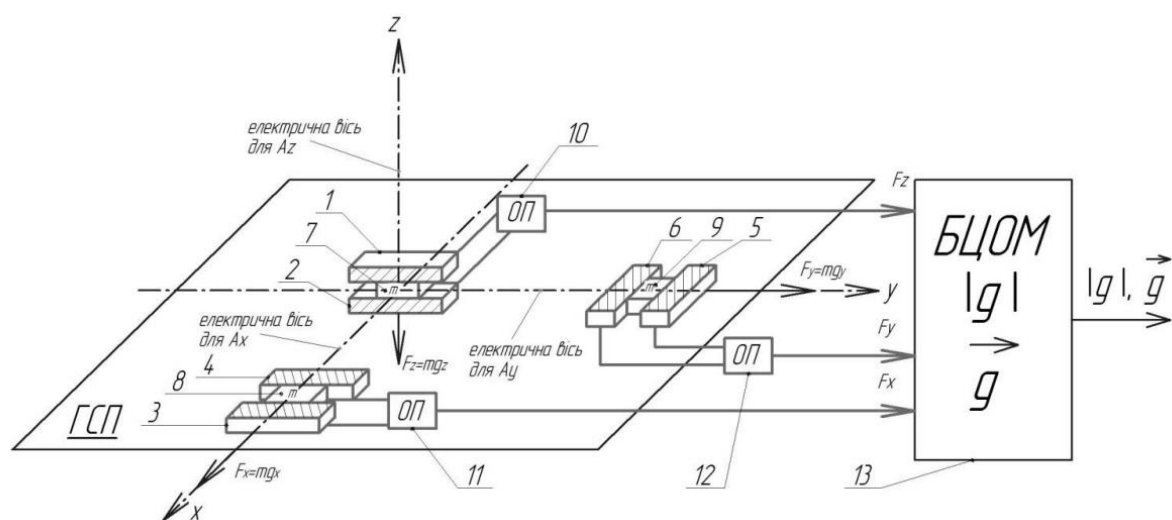


Рисунок 3.3 – Принципова схема трикоординатного ємнісного гравіметра [10,28]

Пропонований трикоординатний ємнісний гравіметр розроблено для застосування в авіаційних гравіметричних системах, де забезпечення високої точності є критично важливим. Його конструкція дозволяє виконувати вимірювання вздовж трьох координат завдяки встановленню чутливих елементів по осях  $Ox$ ,  $Oy$  та  $Oz$  (рис. 2.12). Кожен чутливий елемент має двоканальну структуру, яка включає по одному ємнісному гравіметру.

Система складається з наступних компонентів:

- Обкладинки (1, 2) для осі  $Oz$ ;
- Обкладинки (3, 4) для осі  $Ox$ ;
- Обкладинки (5, 6) для осі  $Oy$ ;
- Ідентичні інерційні маси (7, 8, 9).

Ця конструкція забезпечує симетричність і рівномірність функціонування пристрою, що є важливим для точності вимірювань у складних умовах експлуатації (див. рис. 2.12).

### Висновок до розділу 3

Проведено аналіз класифікації похибок чутливого елемента. Доведено відсутність інструментальних похибок у роботі двоканального МЕМС ЄЧЕ, що підтверджує його надійність та точність у вимірюваннях. Досліджено проблему дрейфу нульового пункту ємнісних гравіметрів, що виникає через поступове "втомлення" пружного елемента під постійним навантаженням. Для її вирішення запропоновано три підходи: збільшення кількості вимірювань у трьох положеннях осі чутливості, програмну компенсацію, яка усуває постійні складові сигналу, та ускладнення конструкції, зокрема розворот гравіметра на  $180^\circ$  навколо вектора тяжіння, що забезпечує високу точність і мінімізує похибки. Розроблено концепцію трикоординатного ємнісного гравіметра, який забезпечує вимірювання вздовж трьох осей ( $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ ) завдяки використанню двоканальних чутливих елементів. Такий підхід дозволяє враховувати горизонтальні складові прискорення ( $g_x$ ,  $g_y$ ), що суттєво зменшує похибки в динамічних системах. Використання багатоканальної архітектури забезпечує стійкість до шумів, температурних дрейфів та інших зовнішніх впливів, що робить трикоординатний ємнісний гравіметр перспективним рішенням для авіаційних гравіметричних систем.

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄЧЕ. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ. ОГЛЯД ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛУ ЄЧЕ ПРИ ДІЇ ЗБУРЕНЬ

### 4.1 Дослідження стійкості двоканального МЕМС ЄЧЕ

Через інерційну властивість приладів, можуть виникати перехідні процеси та динамічні похибки. Стійкість систем автоматичного керування полягає у здатності системи утримувати регульовану величину поблизу заданого значення, незважаючи на будь-які реальні збурення. Стійкість двоканального ЄЧЕ є нелінійною, проте ця нелінійність є незначною і можемо припустити, що передатна функція матиме лінійний характер. Передатне відношення було отримано в рівнянні (1).

Зробимо наступні заміни:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad 2\xi\omega_0 = \frac{n}{m},$$

$$W_{\text{ЄЧЕ}}(p) = \frac{K_{\text{ЄЧЕ}}}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (1.1)$$

Обираємо власну частоту  $\omega_0 = 0,1$  рад/с, коефіцієнт демпфування  $\xi = 0,705$ ,  $K_{\text{ЄЧЕ}} = 0,4$ :

$$W_{\text{ЄЧЕ}}(p) = \frac{0,4}{p^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,705p + 0,1^2}, \quad (1.1)$$

Отримали рівняння, яка показує коливальний процес ІМ:

$$W_{\text{ЄЧЕ}}(p) = \frac{0,4}{p^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,705p + 0,1^2}, \quad (2.2)$$

Передатна функція перетворення у напругу:

$$W_{\text{ЄЧЕ}}(p) = \frac{40}{100p^2 + 14p + 1}, \quad (1.1)$$

Основними критеріями оцінювання є аналітичні та графічні. Оцінимо стійкість системи за критерієм Найквіста та критерієм Гурвіца.

## 4.2 Стійкість системи за критерієм Гурвіца

За критерієм Гурвіца головний визначник формується з коефіцієнтів характеристичного рівняння. По головній діагоналі розташовуються коефіцієнти від  $a_{n-1}$  до  $a_n$  у порядку спадання індексів. Вище діагоналі записуються коефіцієнти зі зменшуваними індексами, а нижче — зі зростаючими. Якщо індекс перевищує  $n$  або менший за нуль, замість коефіцієнта проставляється нуль.

Характеристичне рівняння двоканально ЄЧЕ матиме вигляд:

$$D(p) = T^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + (1 + K_{\text{ЄЧЕ}}) = 100p^2 + 14p + 1, \quad (2.2)$$

За критерієм Гурвіца система є стійкою якщо, всі визначники мають однаковий знак із старшим коефіцієнтом характеристичного рівняння. Якщо  $a_n > 0$ , визначники повинні бути додатними.

Перевіряємо умову стійкості системи:

$$\begin{aligned} a_0 &= T^2 = 100 > 0 \\ a_1 &= 2 \cdot \xi \cdot T = 14 > 0, \\ a_2 &= 1 + K = 40 > 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Отже, за критерієм Гурвіца система двоканального ЄЧЕ є стійкою.

### 4.3 Стійкість системи за критерієм Найквіста

Система стійкості за Найквістом базується на аналізі частотної характеристики. Вона визначає стійкість системи автоматичного керування за замкнутим контуром. Система є стійкою, якщо кількість обходів критичної точки  $(-1,0)$  на комплексній площині дорівнює числу полюсів передавальної функції, які знаходяться в правій півплощині.

Передатна функція двоканального ЄЧЕ:

$$W_{\text{ЄЧЕ}}(p) = \frac{40}{100p^2 + 14p + 1}, \quad (1.1)$$

Частотну функцію отримуємо, підставивши  $p = j\omega$ :

$$W(j\omega) = \frac{40}{-100\omega^2 + 14j\omega + 1} = \frac{40(1 - 100\omega^2 + 14j\omega)}{(1 - 100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2}, \quad \#(1.1)$$

Виділяємо дійсну та уявну частини та знаходимо точку амплітудно-фазової характеристики:

$$W(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega), \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} X(\omega) = \frac{40(1 - 100\omega^2)}{(1 - 100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2} \\ Y(\omega) = \frac{40(14\omega)}{(1 - 100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2} \end{cases}, \quad (1.1)$$

$$X(0) = 40, \quad (1.1)$$

Будуємо годограф Найквіста у MATLAB:

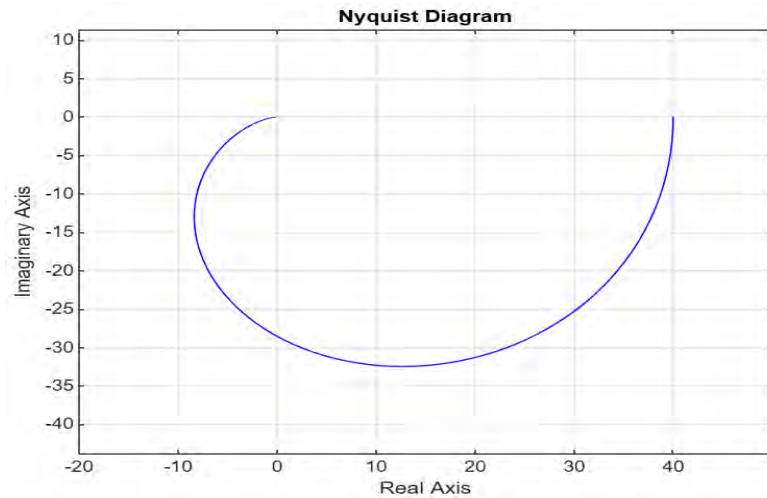


Рисунок 4.1 –

За критерієм Найквіста графік не охоплює точку  $(-1; j0)$ , отже система є стійкою.

#### 4.4 Програма для моделювання роботи двоканального ЄЧЕ під дією збурень

Програмне забезпечення для моделювання роботи на ЕОМ. Програма написана мовою C#. Об'єктно-орієнтована мова програмування C#, розроблена Microsoft під керівництвом Андерса Гейлсберга. Синтаксис схожий на C++ і Java, мова має сувору статичну типізацію, підтримує поліморфізм, події, властивості, винятки та XML-коментарі. Вона запозичила переваги C++, Delphi, і Smalltalk, усунувши недоліки, як-от множинне успадкування. Для моделювання на ЕОМ використовуємо рівняння типу Матьє-Хілла.

## 4.5 Інтерфейс програмного забезпечення на ЕОМ

Додаток містить основне робоче вікно (рис. 4.2) для введення параметрів моделювання, а результати обчислень представлено у вигляді таблиці та графіків.

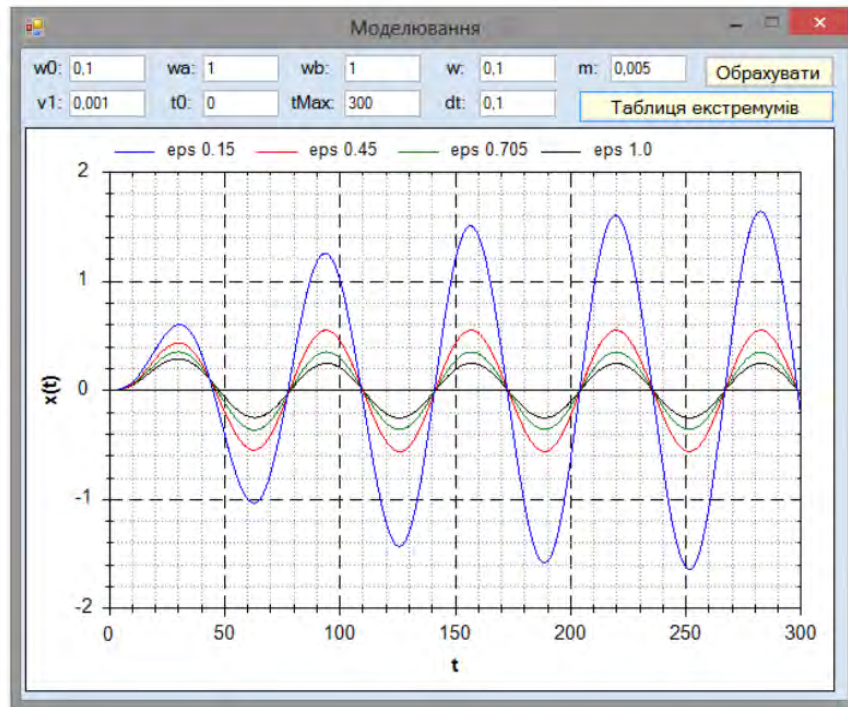


Рисунок 4.2 – Графік вхідних параметрів

При моделюванні задаємо перелік основних параметрів, а саме: коефіцієнт демпфування ( $\xi$ ), частота коливань ( $\omega$ ), власна частота ( $\omega_0$ ), амплітуда збурюючого впливу по осі  $Oz$  ( $\omega_a$ ), амплітуда збурюючого впливу по осі  $Oy$  ( $\omega_b$ ), початковий час ( $t_0$ ), межа інтегрування ( $t_{max}$ ), крок інтегрування ( $dt$ ), маса чутливого елемента ( $m$ ) [10].

## 4.6 Цифрове моделювання збурень двоканального ЄЧЕ

Розглянемо зміну амплітуди вихідного сигналу  $x = x'(t)$  при  $\omega = \omega_0 = 0,1$  рад/с, коефіцієнти демпфування прийнемо  $\xi = 1; 0,705; 0,45; 0,15$ . Амплітуда



збурення  $\omega_a = \omega_b = 1 \text{ м/с}^2$ . Після моделювання (рис.1), резонанс виникає при малому демпфуванні.

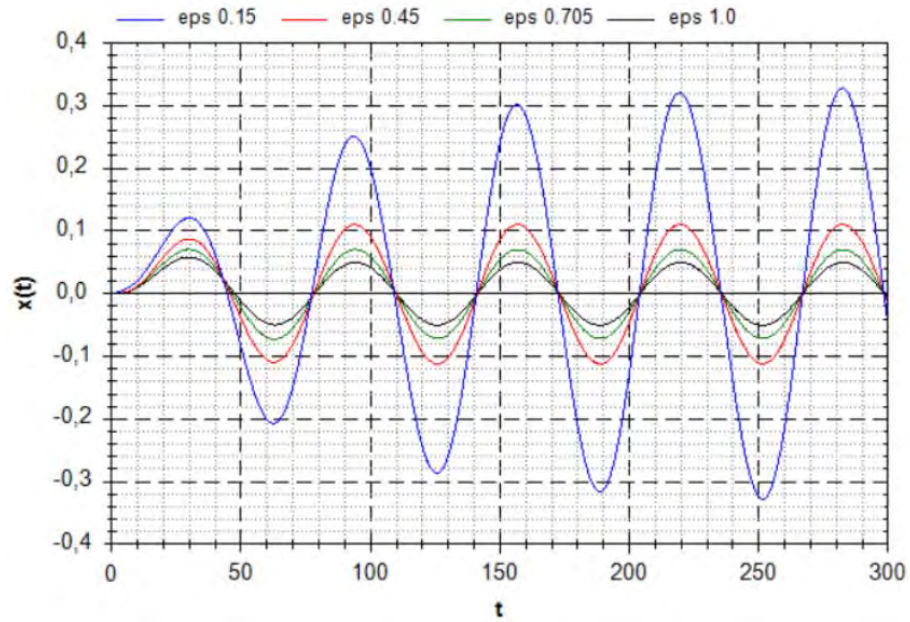


Рисунок 4.3 – Зміна амплітуди сигналу  $x = x'(t)$

З графіку видно, що збільшення коефіцієнта демпфування призводить до зниження амплітуди усталених вимушених коливань.

#### 4.7 Експериментальне дослідження ЄЧЕ на лабораторному стенді

Для дослідження двоканального ЄЧЕ створено лабораторну установку, схему якої представлено на рис. 5.1. Вона включає генератор змінної напруги, вібростенд ГМК-1 із закріпленим ЄГ, підсилювач сигналу, модуль оцифрування даних і комп'ютер для обробки та відображення результатів. Комп'ютер також може моделювати функції бортового обчислювача у складі АГС.

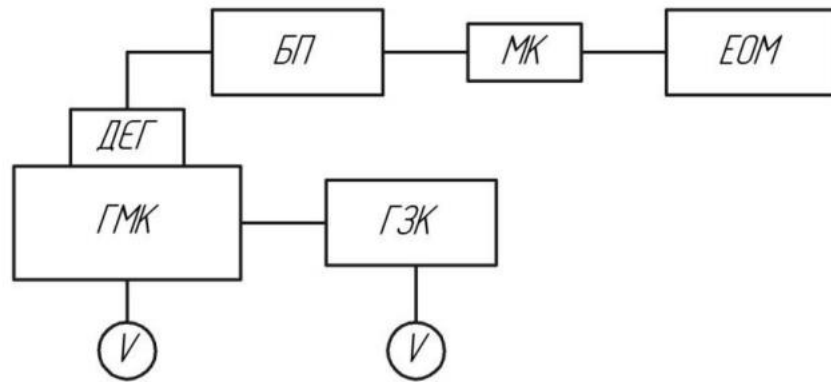


Рисунок 4.4 – Принципова схема установки для проведення експерименту ДЄГ

ГМК – генератор механічних коливань; ДЄГ – двоканальний ємнісний гравіметр; БП – блок підсилення; МК – мікросистема збирання даних; ГЗК – генератор змінної напруги живлення; М – вольтметр для реєстрації напруги [1].

#### 4.8 Двоканальний ємнісний чутливий елемент

В якості чутливого елемента було обрано два ММА8452 [10].

#### 4.9 Вібростенд лабораторної установки

Вібростенд ГМК-1 (рис. 5.3) є одним із ключових компонентів лабораторного стенду. Він складається з двох магнітопроводів, які формують соленоїд із рухомим стрижнем, закріпленим за допомогою мембранних опор. Рух стрижня забезпечується обмотками збудження і керування, що перетворюють напругу у переміщення.



Рисунок 4.5 – Вібростенд ГМК-1

Гнучкі опори забезпечують переміщення стрижня лише вертикально, створюючи коливання, які передаються на робочий стіл. Це забезпечує дію коливань на ємнісний гравіметр, розташований на столі.

#### 4.10 Установка для градуювання ЄЧЕ

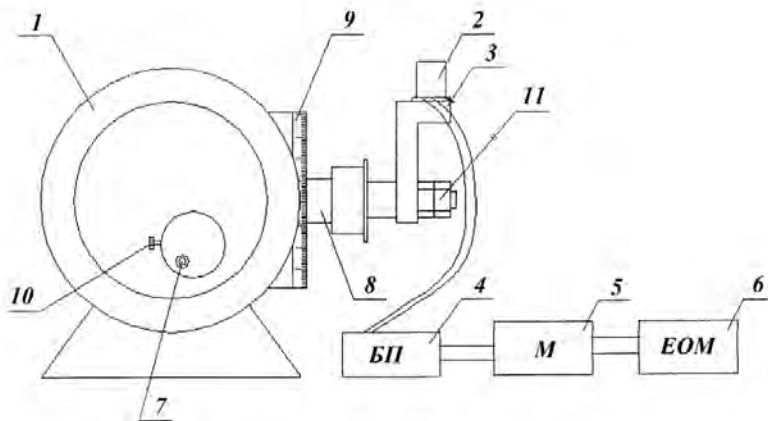


Рисунок 4.6 – Лабораторна установка для градуювання чутливого елемента

: 1 – оптична ділильна головка; 2 – ДСГ; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки [1, 10].

Таблиця 4.1 - Градувальна таблиця для чутливих елементів

№	$\alpha_z$ , град	$g_{z\text{експ}}$ , мГал	$g_{z\text{теор}}$ , мГал	Відхилення $g_{z\text{експ}}$ від $g_{z\text{теор}}$ мГал
1	0	981118,540	981118,542	0,002
2	10	966213,124	966213,138	0,014
3	20	921949,733	921949,850	0,117
4	30	849673,801	849673,583	0,218
5	40	751580,806	751580,406	0,400
6	50	630651,340	630650,839	0,501
7	60	490558,551	490559,272	0,721
8	70	335563,192	335562,312	0,880
9	80	17366,044	17365,143	0,901
10	90	0	0	0

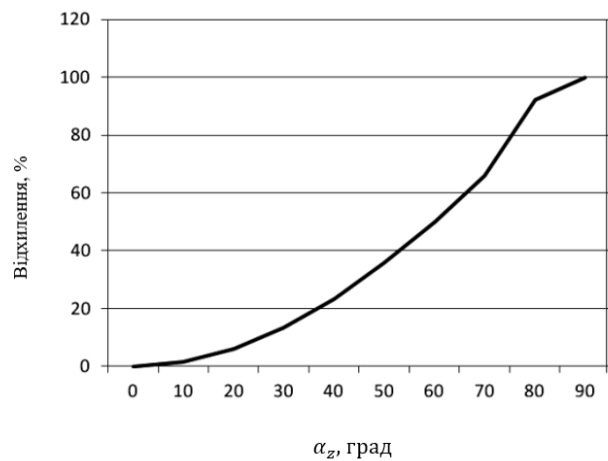


Рисунок 4.7 – Графік, який показує взаємозв'язок між відхиленням вимірювальної осі чутливих елементів  $\alpha_z$  та поточним значенням гравітаційного прискорення.

З таблиці 4.1 видно, що різниця між аналітично обчисленими та експериментально вимірними відхиленнями вимірювальної осі ДЄГ автоматизованої АГС на кут  $\alpha_{zaz}$  не перевищує 0,5 мГал. Величина кута повороту вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі безпосередньо впливає на вихідні показники ДЄГ і на рівень його похибки.

Оскільки гравіметричні вимірювання виконуються в умовах руху, необхідно забезпечити постійний збіг вимірювальної осі ДЄГ із довідковою вертикаллю. Для цього запропоновано розробити систему стабілізації АГС, яка забезпечує точне вирівнювання осі чутливості ДЄГ у вертикальному положенні з допустимою похибкою стабілізації в межах 0,5–15 кут. на хв.

#### 4.11 Параметри роботи установки

Установка знаходиться в КПІ ім. Ігоря Сікорського. Широта: 50.449052°, Довгота: 30.461085°.

Згідно з формулою [10], для цих координати  $\gamma_0$  прискорення сили тяжіння:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e}(1 + 0,0052884 \cdot \sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2 2\varphi), \quad (4.1)$$

Знаходимо довідкове значення прискорення сили тяжіння  $\gamma_{0КПІ}$ :

$$\gamma_{0КПІ} = 9,78049(1 + 0,0052884 \cdot \sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2(2 \cdot 50.449052)) = 9.81118539 \frac{M}{c^2}, \quad (4.2)$$

$$\gamma_{0КПІ} = 9.81118539 \frac{M}{c^2}, \quad (4.3)$$

Під час експериментів гравіметр встановлювався у вертикальному положенні. Всі дослідження проводилися на спеціалізованому вібростенді, що забезпечував стабільність і точність вимірювань.

#### 4.12 Проведення експерименту чутливих елементів

Дані експериментальних вимірювань записувалися та оброблялися автоматично за допомогою комп'ютера з інтервалом приблизно 10 секунд. Для кожного набору вимірювань була визначена систематична похибка  $\Delta g$ , яка розраховується за формулою:

$$\Delta g = \left| \overline{g_{\text{експ}}(t)} - \gamma_{\text{ОКПІ}} \right|, \quad (4.4)$$

Де  $\overline{g_{\text{експ}}(t)}$  середнє значення вихідного сигналу чутливих елементів, отримане протягом 10-секундного періоду спостереження:

$$\overline{g_{\text{експ}}(t)} = \frac{1}{N_{\text{експ}} + 1} \sum_{i=0}^{N_{\text{експ}}} g(t_i), \quad (4.5)$$

де  $N_{\text{експ}}$  — кількість вимірювань за 50 секунд,

$g(t_i)$ — значення вихідного сигналу чутливих елементів у момент часу  $t_i$ .

Абсолютна похибка вимірювань  $\Delta g_{\text{експ}}$  обчислюється за формулою:

$$\Delta g_{\text{експ}} = \frac{\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}}}{\sqrt{N_{\text{експ}}}} \cdot t_p, \quad (4.6)$$

де  $\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}}$  – середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{експ}}} \cdot \sum_{i=0}^{N_{\text{експ}}} [\overline{g(t_i)} - \overline{g_{\text{експ}}}]^2}, \quad (4.7)$$

$t_p = qt(p, d)$  коефіцієнт зворотного розподілу Стюдента для заданого рівня довірчої імовірності  $p$  та кількості ступенів свободи  $d = N_{\text{експ}}$ .

Таблиця 4.2 - Похибки чутливих елементів, викликані вібраціями основи

$\omega$ , рад/с	$\overline{g_{\text{експ}}}(t)$ , мГал	$\Delta g_{\text{експ}}$ , мГал	$\Delta g$ , мГал
0	981118,5400	0.001149	0.00006004
0,5	981121,4584	0.006189	2.91861151
1,0	981121,5942	0.048074	3.05382639
5,0	981123,9366	0.581028	5.39613128
10,0	981127,1009	0.850994	8.89864638
30,0	981131,6115	2.764098	13.0710672

Під час нульових налаштувань вібростенду було встановлено, що вихідний сигнал чутливих елементів дорівнює приблизно 0.00006 мГал, що відповідає значенням з довідковими значеннями прискорення сили тяжіння (ПСТ). Для поступальних вібрацій з частотою до 10 рад/с точність вимірювань чутливих елементів становить 0.5 мГал.

Відповідно до даних [10,22] та результатів моделювання резонансний режим для системи може виникати на частотах  $\omega_0 = 0.033, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$  рад/с. Зниження резонансної частоти сприяє зменшенню амплітуд поступальних збуджуючих прискорень, оскільки їхній спектр досягає максимуму на частоті 1640 рад/с. Розрахункові дані свідчать, що навіть при резонансному режимі система

забезпечує високу точність вимірювань, а похибки чутливих елементів залишаються незначними, як наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Похибки при резонансному режимі роботи

$\omega$ , рад/с	$\overline{g_{\text{експ}}(t)}$ , мГал	$\Delta_{g_{\text{експ}}}$ , мГал	$\Delta g$ , мГал
0	981118,5402	0.001144	0.000060
0,033	981118,6687	0.198115	0.126387
0,05	981118,7436	0.369129	0.204864
0,1	981119,3435	0.542480	0.485575
0,2	981119,7604	0.412641	0.320258
0,3	981120,6523	0.375337	0.210509

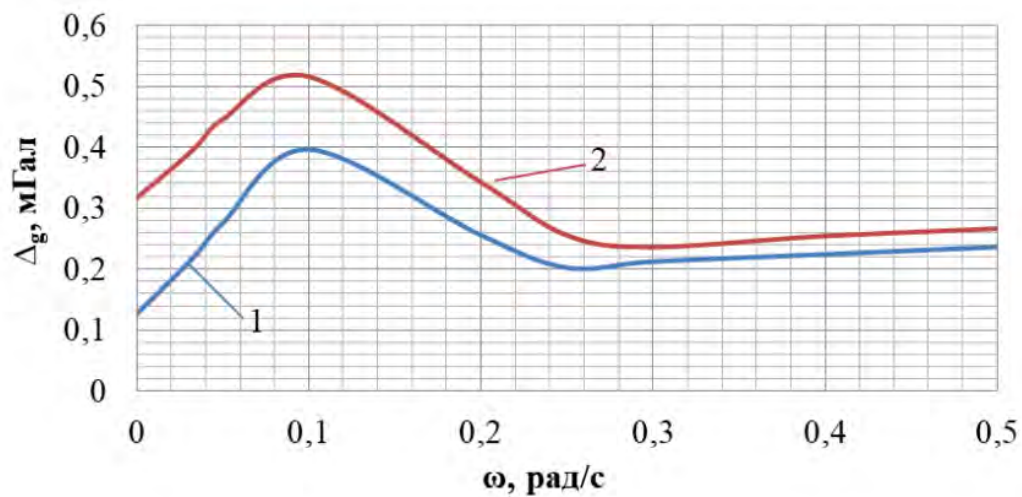


Рис. 4.5 – Результати цифрового моделювання та експерименту [10].

- 1 – дані, отримані під час цифрового моделювання;
- 2 – результати, отримані експериментальним шляхом.



Експериментальні результати, наведені у таблиці 4.3, точно відповідають теоретичним розрахункам, що підтверджується графіком на рисунку 4.5. Виміряні значення майже ідентичні, що можна пояснити використанням обладнання, яке має певні обмеження для таких випробувань. На графіках видно, що найвищі похибки виникають при частоті 0,1 рад/с, де вони досягають максимального значення, але все ж залишаються в межах допустимої точності 0,5 мГал [1,10].

#### 4.13 Метрологічні характеристики чутливих елементів

У відсутність вібрацій, двоканального ЄЧЕ може працювати як наземний гравіметр. Експериментальна та теоретична похибка двоканального ЄЧЕ при відсутності будь-яких збурень становить 0,00006 мГал. Таким чином, статична характеристика двоканального ЄЧЕ у якості наземного гравіметра складатиме:

За відсутності вібраційних збурень та двоканальної конструкції чутливих елементів гравіметр може ефективно виконувати функції наземного гравіметра. Експериментальна і теоретична похибка двоканального ЄЧЕ у таких умовах становить 0,00006 мГал. Таким чином, статична характеристика двоканального ЄЧЕ як наземного гравіметра складає:

$$\bar{g}_{ДЕГ} = \bar{g}_{ДЕГ} \pm 6 \cdot 10^{-5} \text{ мГал}, \quad (4.8)$$

При динамічних збуреннях динамічний двоканальний чутливий елемент зберігає високу точність вимірювань:

$$\bar{g}_{ДЕГНК} = \bar{g}_{ЕКСП} \pm 0,5 \text{ мГал}, \quad (4.9)$$

Похибка двоканального чутливого елемента у складі НК:

$$\delta_g = \frac{\Delta g}{\bar{g}_{\text{ЕКСП}}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{981102.37453} \cdot 100\% = 5,1 \cdot 10^{-5} \%, \quad (4.10)$$

#### Висновки до розділу 4

Провели дослідження системи двоканального ЄЧЕ з критеріями стійкості Гурвіца та Найквіста. В обох випадках система є стійкою. Розглянуто програму для цифрового моделювання вхідних збурень двоканального ЄЧЕ на ЕОМ. Описано методику проведення експериментальних досліджень лабораторної установки для вимірювання параметрів двоканального ЄЧЕ. Встановлено, що кут нахилу вимірювальної осі двоканального ЄЧЕ відносно довідкової вертикалі прямо пропорційно впливає на вихідні показники та рівень похибки. Експериментально визначено похибку вимірювань двоканального ЄЧЕ, яка, навіть у резонансних умовах  $\omega_0 = 0,033; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$  рад/с, не перевищувала 0,5 мГал. Найбільше значення похибки спостерігалось при частоті  $\omega_0 = 0,1$  рад/с, однак це не впливало на загальну точність вимірювань.

Результати підтверджують, що використання розробленої лабораторної установки дозволяє здійснювати вимірювання двоканальним ЄЧЕ із високим рівнем точності. Максимальна похибка, яка становила менше 0,5 мГал, демонструє стабільність і надійність системи навіть за умов резонансу.

## **РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «STABFLY SYSTEM»**

### **5.1 Опис ідеї проєкту**

Ідеєю стартапу є розробка системи стабілізації безпілотного літального апарату на основі використання сучасних ємнісних чутливих елементів. Створення такої системи дозволить забезпечити більш ефективне функціонування безпілотних апаратів у складних умовах, де стабільність і точність управління мають вирішальне значення. Чутливі елементи, що застосовуються у запропонованій системі, дозволяють враховувати всі необхідні параметри положення апарату у просторі, яка забезпечують більш точні вимірювання та покращують стабілізацію та підвищують ефективність системи. Такий підхід дозволяє оптимізувати технічні характеристики апарату та підвищує його конкурентоспроможність на ринку. Система стабілізації безпілотних літальних апаратів може бути застосована у сферах де потрібна висока точність стабілізації. У таблиці 5.1 наведено основні напрямки застосування, ключові вигоди для потенційних користувачів і можливі ринки збуту.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проєкту [30]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та побудова системи стабілізації безпілотного літального апарату з використанням ємнісних чутливих елементів	Фото та відеозйомка при моніторингу об'єктів	Стабілізація камер при проведенні моніторингу об'єктів, зокрема при моніторингу ЛЕП, моніторингу автошляхів, контроль будівництва капітальних об'єктів, контролю сервісних робіт, екологічний моніторинг, розвідка місцевості
	Доставка вантажів	Стабілізація апарату для надійного транспортування вантажів та зменшення вібрацій та коливань при автоматичному скиду вантажу або використанням з системою тросового спуску (лебідкою)
	Дрон FPV	Покращення стабільності при швидкісному маневруванні

Запропонована система стабілізації безпілотного літального апарату на основі ємнісних чутливих елементів забезпечує значне покращення стабільності та точності управління в різних умовах експлуатації. Її застосування є перспективним у таких сферах, як фото- та відеозйомка, моніторинг об'єктів, доставка вантажів та високошвидкісне маневрування FPV-дронів. Система є універсальною та підходить для більшості сфер застосування користувачів та є більш дешевим та ефективним у використанні.

Таблиця 5.2. Інформаційна карта стартап-проєкту [30]

Назва проєкту	Система стабілізації безпілотного літального апарату з використанням ємнісних чутливих елементів
Автори	Бегов А.А., Безвесільна О.М.
Анотація	Система з чутливими елементами забезпечує високу точність вимірювання прискорення сили тяжіння, що дозволяє покращити системи стабілізації та управління безпілотних літальних апаратів
Термін реалізації	1 рік
Необхідні ресурси	Людські, фінансові
Опис проблеми, яку вирішує стартап-проєкт	Покращення вимірювання прискорення сили тяжіння та стабілізації при роботі безпілотних літальних апаратів
Ціль	Мінімізувати похибки вимірювання прискорення сили тяжіння та покращити систему стабілізації й управління БПЛА
Очікуваний результат	Розширення сфер застосувань де потрібна висока точність стабілізації та точні значення прискорення сили тяжіння

Для оцінки конкурентоспроможності запропонованої ідеї проєкту, було проведено аналіз техніко-економічних властивостей та характеристик розробки у порівнянні з подібними пропозиціями на ринку. Аналіз дозволяє визначити сильні, нейтральні та слабкі сторони проєкту, а також встановити його конкурентні переваги. Першим етапом є визначення переліку основних техніко-економічних показників, які характеризують ідею проєкту. Наступним кроком було проведення порівняння цих показників із аналогічними показниками проєктів-конкурентів, товарів-замінників або існуючих рішень на ринку.

для власної ідеї визначаються показники, що мають [30]:

- слабкі сторони (W);
- нейтральні сторони (N);
- сильні сторони (S).

Отримані результати занесено до Таблиці 5.3, яка наочно демонструє техніко-економічну оцінку ідеї проєкту, підкреслюючи його ключові переваги, нейтральні аспекти та області для покращення.

Таблиця 5.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [30]

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Yuneec Typhoon H Plus	Skydio 2+	DJI FlyCart 30			
1.	Габаритні розміри	Малі	Середні	Малі	Великі	-	-	+
2.	Вартість (економічність)	Середня	Висока	Середня	Висока	-	-	+
3.	Об'єм акумулятора (мАг)	5000	5250	4280	11000	-	+	-
4.	Тип двигунів	Безщітковий	Безщітковий	Безщітковий	Безщітковий	-	+	-
5.	Простота виробництва	Низька	Середня	Висока	Низька	+	-	-
6.	Екологічність	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	-	+	-

На основі аналізу таблиці 5.3, яка містить шість техніко-економічних характеристик, можна зробити висновок, що проєкт має вагомні переваги. Малі габарити та об'єм акумулятора є його сильними сторонами, що забезпечують високу зручність у використанні та достатню тривалість роботи. простота виробництва виявляється слабкою стороною, яка потребує подальшого вдосконалення.

З шести проаналізованих характеристик, дві з них є сильними, дві нейтральними та одна слабкою. Це свідчить про те, що у проєкті домінують сильні сторони, які забезпечують його конкурентоспроможність та підвищують можливості успішної реалізації на ринку.

## **5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту**

У цьому розділі буде проведено технологічний аудит системи стабілізації та керування безпілотного літального апарату. Аудит охоплює ключові аспекти реалізації проєкту, зокрема використання програмного забезпечення для стабілізації та управління, інтеграцію з вбудованими сенсорами та модулями, а також аналіз і оцінку роботи.

Для проведення технологічного аудиту буде використано таблицю 5.4, у якій наведено існуючі технологічні можливості для реалізації запропонованої системи стабілізації.

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту [30]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Використання стандартного контролера з готовим ПЗ	Використання відкритого програмного забезпечення для реалізації базових алгоритмів управління стабілізацією, збору даних сенсорів і аналізу роботи апарату. Застосування стандартних протоколів для обміну даними між компонентами системи стабілізації	Наявні	Доступна
2	Інтеграція існуючого мікроконтролера з модульними рішеннями	Використання доступних апаратних платформ із можливістю підключення сенсорів, систем стабілізації та інших модулів. Реалізація готових алгоритмів для управління стабілізацією, збирання та обробки даних із сенсорів. Інтеграція стандартних інтерфейсів для комунікації між модулями	Наявні	Доступна
3	Розробка власного контролера та спеціалізованого ПЗ	Розробка контролера з урахуванням вимог до високої точності стабілізації. Створення унікальних алгоритмів для управління двигунами та стабілізації в реальному часі. Інтеграція спеціалізованих модулів для аналізу стану апарату, акумулятора та сенсорів під час виконання польотних задач	Наявні	Доступна
Технологія реалізації проекту: використання технології №3				

Проаналізувавши таблицю 5.4, можна зробити висновок, що найкращим варіантом для реалізації проекту є використання технологій, зазначених у варіанті №3. Цей підхід забезпечує максимальну гнучкість у налаштуванні системи стабілізації та управління, дозволяючи адаптувати алгоритми під специфічні потреби безпілотного апарату.



Використання власного мікроконтролера з унікальним програмним забезпеченням надає можливість створити індивідуальну систему, яка відповідає вимогам точності, надійності та функціональності.. Власний мікроконтролер також відкриває можливість впровадження унікальних алгоритмів для аналізу даних і управління стабілізацією в реальному часі.

Варіант №3 забезпечує високий рівень адаптивності та перспективність системи, що робить його найкращим вибором для реалізації проєкту з урахуванням індивідуальних особливостей та вимог.

Такий підхід дозволить інтегрувати обрані вимірювальні пристрої, зокрема розглянутий ємнісний чутливий елемент, акселерометри, гіроскопи, висотомір, магнітометр та інші необхідні апаратні модулі.

Таблиця 5.5. Морфологічна карта [30]

Функції	Проміжні рішення			
Використання чутливого елемента	П'єзоелектричний	Ємнісний	Струнний	
Використання ЕОМ, мікроконтролера	ESP32	STM32	Raspberry Pi	NXP i.MX RT Series

Для реалізації проєкту важлива розробка індивідуального програмного забезпечення, яке враховує всі технічні вимоги системи. Власний підхід до розробки забезпечить ефективне виконання поставлених задач, зокрема пошук оптимального алгоритму та його подальшу оптимізацію. Використання власних рішень у програмному забезпеченні дозволяє уникнути залежності від сторонніх

алгоритмів, що мінімізує ризики, пов'язані з їхньою модифікацією, оновленням чи підтримкою. Такий підхід гарантує гнучкість у розробці та подальшій адаптації системи.

### 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У цьому розділі буде проведено аналіз ринкових можливостей, які можуть бути використані для впровадження системи стабілізації безпілотного літального апарату. Огляд потенційних переваг ринку, а також можливі ризики та загрози, які можуть перешкоджати або впливати на успішну реалізацію проєкту.

Аналіз дозволить узагальнено оцінити ринкове середовище, визначити основні складнощі та розробити стратегії для мінімізації можливих ризиків. Зокрема, буде враховано специфіку впровадження інноваційної системи стабілізації, її переваги в різних сферах.

У таблиці 5.6. проведено оцінку основних показників для детального аналізу потенційного ринку стартап-проєкту.

Таблиця 5.6. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту [30]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	55000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція з боку популярних зарубіжних та внутрішніх компаній країни.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або ринку), %	30

Попередня характеристика свідчить, що обрана галузь має сприятливі умови для ринкового впровадження стартапу, оскільки відсутні специфічні вимоги щодо стандартизації та сертифікації. Це зменшує бар'єри для входу, проте висока конкуренція як із боку популярних зарубіжних компаній, так і внутрішніх виробників створює необхідність розробки унікального продукту з конкурентними характеристиками. Постійне зростання конкуренції визначає потребу у забезпеченні високої точності, адаптивності та надійності системи стабілізації. Подальший аналіз, виконаний у таблиці 5.7, дозволяє визначити ключові групи потенційних клієнтів, їх характеристики та вимоги до продукту. Це забезпечує комплексне розуміння ринкових потреб та орієнтир для розробки продукту, здатного зайняти свою нішу як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках. Успішна реалізація проєкту ґрунтується на здатності задовольнити специфічні вимоги клієнтів, пропонуючи ефективне та надійне рішення для стабілізації безпілотних літальних апаратів.

Таблиця 5.7. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту [30]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
1	Забезпечення стабільної фото- та відеозйомки в польоті	Комерційні оператори, екологічні організації	Використання для моніторингу інфраструктурних об'єктів (ЛЕП, дороги, мости) або екологічного моніторингу	Висока точність стабілізації, довговічність, сумісність із додатковими сенсорами
2	Проведення розвідки та виконання польотів у складних умовах	Військові	Використання для розвідки, виявлення цілей та аналізу місцевості	Висока точність стабілізації Надійність, стійкість до вібрацій, можливість роботи в екстремальних умовах,

3	Стабільне транспортування вантажів	Логістичні компанії	Забезпечення транспортування вантажів	Висока точність стабілізації, мінімізація коливань, стабілізація вантажу
4	Збір даних для дослідницьких цілей	Наукові дослідники	Використання для проведення досліджень, збір даних у важкодоступних місцях	Висока точність стабілізації Висока точність вимірювань, сумісність із додатковими сенсорами

Підсумовуючи дані з таблиці, можна зазначити, що запропонована система стабілізації має значний потенціал для впровадження серед різних груп користувачів, які мають специфічні вимоги та потреби. Розроблена система здатна задовольнити потреби у точній стабілізації, надійності та адаптивності, що є критичними факторами для її успішного застосування.

Водночас варто зазначити, що можливості системи можуть бути розширені шляхом інтеграції додаткових функціональних модулів або адаптації до нових ринкових умов. Це дозволить залучити ширше коло потенційних користувачів та посилити конкурентоспроможність проєкту на ринку.

Таблиця 5.8. Портрет цільового покупця [30]

Що хочуть купити	Система стабілізації для безпілотного літального апарату
Хто покупець	Комерційні оператори, військові, наукові дослідники, екологічні організації, логістичні компанії
Мета купівлі	Забезпечення оптимального рівня стабілізації
Коли покупець купує продукт	Коли необхідно покращити стабільність, підвищити точність або ефективність виконання задач
Де покупець бажає придбати продукт	Інтернет-магазини, соціальні мережі
Мета стартапу	Задовольнити потреби користувачів у точній, надійній та адаптивній системі стабілізації

Аналіз таблиці 5.8 показує, що система стабілізації орієнтована на різні групи покупців: комерційних операторів, військових, наукових дослідників, екологічні організації та логістичні компанії. Основна мета придбання продукту — забезпечення стабільності, точності та надійності під час виконання задач, таких як фото- та відеозйомка, дослідження чи транспортування.

Таблиця 5.9. Фактори загроз [30]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція з міжнародними популярними компаніями	Зменшення кількості продажів	Виконання удосконалення пристрої до вищого рівня, оптимізація для зменшення вартості
2	Швидке «моральне старіння»	Динамічність розвитку технологій швидко вносить нові функції та можливості роблячи інші рішення не актуальними	Пошук нових інноваційних підходів та пропозицій для користувачів. Впровадження актуального функціоналу та технологій
3	Обслуговування та пошкодження	Вихід з ладу системи або окремих її модулів. Іноді в критичні ситуації	Організувати систему на базі модулів, які можна зняти та замінити маючи запасний. Надати послуги з ремонту та обслуговування
4	Взаємозамінність елементів	Необхідність замінити один модуль системи на інший новіший або для виправлення несправності	Система може містити легкі інтерфейси для підключення модулів, датчиків, виконавчих елементів, акумулятора. Модульний підхід дозволить виконувати ці процеси дуже легко
5	Зростання вартості комплектуючих та напівпровідникових компонентів	Зростання вартості комплектуючих призводить до значного подорожчання системи і це знизить продажі	Пошук засобів оптимізації для зменшення вартості за рахунок організації системи та її особливостей. Пошук аналогічних та функціоналом та якістю компонентів з меншою вартістю

Аналіз визначених факторів загроз показує, що успішна реалізація стартапу залежить від здатності ефективно реагувати на виклики, такі як посилення конкуренції, швидка зміна технологій і зростання вартості комплектуючих. Для мінімізації ризиків необхідно впроваджувати регулярний моніторинг ринку,

своєчасно адаптувати продукт до нових вимог, впроваджувати інноваційні рішення та оптимізувати виробничі процеси. Такий підхід дозволить зберегти конкурентоспроможність системи та забезпечити її успішний вихід на ринок.

Таблиця 5.10. Фактори можливостей [31]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Впровадження нових функцій	Адаптація системи до сучасних потреб ринку та розширення функціоналу	Інтеграція інноваційних рішень, таких як нові алгоритми стабілізації та покращені сенсори
2	Зростання попиту на стабілізаційні системи	Збільшення інтересу до систем стабілізації у різних галузях, включаючи логістику, моніторинг та військові задачі	Розробка універсальних рішень для покриття потреб різних сегментів ринку
3	Технологічні вдосконалення	Застосування нових технологій для покращення продуктивності та зниження собівартості	технологій для покращення продуктивності та зниження собівартості Впровадження нових матеріалів і компонентів, що підвищують ефективність
4	Розширення на нові ринки	Можливість виходу на міжнародні ринки з унікальним продуктом	Адаптація системи до міжнародних стандартів та розробка маркетингових стратегій для виходу на нові ринки
5	Інноваційні технології	Використання передових рішень для покращення точності, стабільності та функціоналу системи	Інтеграція новітніх технологій, таких як штучний інтелект, IoT та автоматизовані процеси

Визначені фактори відкривають значні можливості для розвитку стартапу. Використання інноваційних технологій, сучасних підходів до проектування та виробництва, а також інтеграція передових рішень дозволяють створювати продукт із високим рівнем функціональності. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності та популярності системи на ринку, забезпечуючи її широке застосування в різних галузях.

Наступним етапом необхідно виконати ступеневий аналіз конкуренції на ринку. Отримані результати записані у таблиці 5.11.

Таблиця 5.11. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [30]

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Чиста конкуренція	Конкуренти пропонують схожі продукти з аналогічними характеристиками	Поліпшення функціоналу системи, впровадження інновацій, зниження собівартості
2	Глобальний рівень конкуренції	Наявність клієнтів та конкурентів за межами країни	Адаптація системи до міжнародних стандартів, участь у міжнародних виставках
3	Конкуренція за галузевою ознакою	Орієнтація на вузькоспеціалізовані завдання в межах однієї галузі	Розробка рішень, які точно відповідають потребам конкретної галузі
4	Конкуренція за видами товарів	Конкуренція виникає між продуктами одного виду, але різної якості чи ціни	Вдосконалення характеристик продукту, оптимізація співвідношення ціна-якість
5	Конкуренція за характером переваг	Конкуренція залежить від унікальних можливостей продукту	Впровадження нових можливостей, які перевищують функціонал конкурентів
6	Конкуренція за інтенсивністю	Висока популярність окремих брендів, які домінують на ринку	Реєстрація бренду, створення маркетингових стратегій для підвищення впізнаваності продукту

Аналіз конкурентного середовища показує, що успіх стартапу значною мірою залежить від здатності адаптувати продукт до змін ринку та вимог споживачів. Чиста конкуренція, глобалізація ринку та висока інтенсивність брендової боротьби вимагають постійного вдосконалення характеристик продукту, впровадження інноваційних функцій та розробки маркетингових стратегій. Реєстрація торгової марки та створення впізнаваного бренду допоможуть закріпити позиції компанії на ринку.

Розглянемо детальніший аналіз умов конкуренції у галузі. Результати відображено у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12. Аналіз конкуренції у галузі за М. Портером [30]

Складові аналізу	Прямі конкуренти у галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Фактори	Yuneec Typhoon H Plus, Skydio 2+, DJI FlyCart 30	Наявність альтернативних дронів інших брендів	Виробники сенсорів, контролерів, акумуляторів	Військові, екологічні організації, наукові дослідники, логістичні компанії	Інші дрони або системи стабілізації з подібним функціоналом
Загрози та можливості	Конкуренція через високу якість продуктів	Можливість появи інноваційних аналогів	Постачальники впливають на вартість та доступність	Формують попит і оцінюють стабільність та ефективність	Можливість втрати клієнтів через доступніші або простіші замінники

Основна конкуренція в галузі зосереджена на пропозиції продуктів із високими технічними характеристиками. Існує ризик впливу постачальників на вартість компонентів, що може ускладнити виробничий процес. Потенційні клієнти, як-от військові, екологічні організації та дослідники, очікують надійності, точності та високої функціональності, що формує попит на вдосконалення системи. Товари-замінники, хоча і присутні, не завжди відповідають унікальним потребам користувачів, що залишає простір для конкурентних переваг через інноваційні рішення.

Конкурентоспроможність стартапу є ключовим фактором для його успішної реалізації на ринку. Визначення факторів, які забезпечують перевагу над конкурентами, дозволяє оцінити потенціал проекту та сформувавши стратегію його розвитку.

Результати основних факторів конкурентоспроможності для стартапу наведено у таблиці 5.13.



Таблиця 5.13. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [30]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Універсальність	Система адаптується до різних галузей і задач, забезпечуючи широкий спектр застосування
2	Слідкування за сучасними тенденціями	Адаптація до новітніх технологій та змін ринку сприяє актуальності продукту
3	Постійний розвиток та вдосконалення	Оновлення функціональних можливостей забезпечує тривалу конкурентоспроможність
4	Підтримка та обслуговування	Модульна система дозволяє легке технічне обслуговування та підтримку
5	Забезпечення оптимальної якості	Гарантована якість відповідає очікуванням клієнтів
6	Гарантійні зобов'язання	Надання гарантій на обладнання підвищує довіру клієнтів

Визначивши ключові фактори конкурентоспроможності системи стартап-проекту, переходимо до проведення аналізу, спрямованого на виявлення її сильних та слабких сторін. Отримані дані у таблиці 5.14

Таблиця 5.14. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «StabiFly System» [30]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Фактор конкурентоспроможності у порівнянні з Yuneec Typhoon H						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Універсальність	16							
2	Слідкування за сучасними тенденціями	17						+	
3	Постійний розвиток та покращення	18						+	
4	Підтримка та обслуговування засобів	15			+				
5	Забезпечення оптимальної якості	19				+			
6	Гарантійні зобов'язання	14				+			

У результаті проведеного аналізу конкурентоспроможності встановлено, що ключовими перевагами стартап-проєкту є його універсальність та здатність адаптуватися до сучасних тенденцій і потреб клієнтів. Водночас були виявлені певні недоліки, зокрема пов'язані з обмеженими можливостями у сфері забезпечення технічної підтримки та обслуговування. Також необхідно зосередитися на забезпеченні безперервного розвитку системи та її програмного забезпечення для збереження актуальності й конкурентних переваг.

Наступним етапом є проведення SWOT-аналізу стартап-проєкту, який дозволяє оцінити його сильні та слабкі сторони, можливості та загрози. Отримані дані допоможуть сформулювати стратегічні напрямки розвитку проєкту.

Таблиця 5.15. SWOT-аналіз стартап-проєкту [30]

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Універсальність використання</li> <li>2. Висока точність вимірювань</li> <li>3. Стабільність роботи системи</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Падіння попиту</li> <li>2. Конкуренція</li> <li>3. Відсутність фінансового забезпечення</li> </ol>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Розширення на міжнародні ринки</li> <li>2. Впровадження нових покращень</li> <li>3. Забезпечення підтримки користувачів</li> <li>4. Покращення точності вимірювань</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Падіння актуальності</li> <li>2. Збільшення вартості компонентів</li> <li>3. Зростаюча конкуренція</li> </ol>

У результаті виконання SWOT-аналізу стартап-проєкту було визначено ключові сильні сторони, можливості, слабкі сторони та загрози, які можуть вплинути на розвиток та реалізацію проєкту. Проведемо аналіз та визначення альтернатив ринкового впровадження стартап-проєкту на основі отриманих

даних SWOT-аналізу. Результати альтернативного ринкового впровадження стартап-проєкту наведено у таблиці 5.16

Таблиця 5.16. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту [30]

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкової поведінки)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Застосування унікальних підходів до вимог користувачів	Висока	5 міс.
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями. Впровадження інноваційних технологій для полегшення впливу постійного вдосконалення	Середня	2 міс.
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	3 міс.

Проаналізувавши запропоновані альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту, обрано стратегію компенсації слабких сторін за рахунок використання ринкових можливостей. Цей підхід дозволяє спрямувати ресурси на розробку. Використання інноваційних підходів до систем із врахуванням сучасних тенденцій формує позитивне сприйняття товару серед споживачів. Такі системи можуть мати характеристики, подібні до аналогів, але водночас пропонують унікальні переваги, зокрема у функціональності. Такий підхід сприяє підвищенню конкурентоспроможності стартапу та адаптації до потреб користувачів.

#### 5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

На початковому етапі розроблення ринкової стратегії проведемо визначення стратегії охоплення ринку, що включає аналіз та характеристику цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.17. Вибір цільових груп потенційних споживачів [30]

№ 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	Промислові компанії	Так	Середній	Середня	Просто
2	Фізичні особи	Так	Високий	Висока	Середня
3	Науковці/дослідницькі організації	Ні	Середній	Середня	Просто
4	Військові групи	Так	Високий	Висока	Просто

Цільовими групами обрано: промислові компанії та військові підрозділи.

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано цільові групи, які включають промислові компанії та військові підрозділи. Попит у цих сегментах значно зростає, адже вони вимагають нових технічних рішень, що відповідають сучасним викликам, зокрема стабільності, точності та адаптивності систем. Важливою умовою є забезпечення конкурентоспроможної вартості продукту, що дозволяє залучити більше клієнтів у цих сферах.

Для забезпечення ефективного впровадження системи в обраних сегментах ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку, яка відображає ключові напрямки дій та пріоритети. Основні результати відображено у таблиці 5.18.

Таблиця 5.18. Визначення базової стратегії розвитку [30]

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Стратегія недиференційованого маркетингу	Адаптація під сучасні тенденції та потребу, які є актуальними для користувача	Стратегія диференціації

Базовою стратегією розвитку було обрано диференційований підхід, який спрямований на створення продукту з унікальними характеристиками, що відповідають сучасним потребам ринку. Такий вибір дозволяє сформувати конкурентну перевагу шляхом адаптації до актуальних тенденцій і очікувань користувачів. Стратегія недиференційованого маркетингу, у свою чергу, дає можливість орієнтуватися на широку аудиторію, зосереджуючи увагу на ключових перевагах продукту. Це забезпечує високий потенціал для залучення різних категорій споживачів і сприяє ефективному виходу на ринок.

Таблиця 5.19. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [30]

№ 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	Ні	Забирати існуючих	Частково. Це обумовлено такими аспектами:  - апаратні компоненти - технічні підходи - метрологічні характеристики - принцип дії	Стратегія Конкурентної ніші

Компанія має особливості, які пов'язані з частковим врахуванням характеристик аналогічних чи подібних систем. Це пояснюється тим, що певні технічні параметри, принципи роботи, підходи до реалізації та апаратна база можуть збігатися з існуючими рішеннями. У стратегії конкурентної поведінки

обрано напрямок зайняття конкурентної ніші. Це дозволяє компанії виділитися на ринку, пропонуючи оптимізоване рішення, яке відповідає сучасним вимогам споживачів і перевершує аналоги за функціональністю.

На основі визначених вимог споживачів та обраного сегменту ринку, сформовано підхід до розробки стратегії позиціонування продукту. Ця стратегія базується на аналізі конкурентного середовища, адаптації до потреб клієнтів і використанні обраних стратегій розвитку та конкурентної поведінки. Позиціонування спрямоване на формування унікальної ринкової позиції, яка дозволить споживачам чітко ідентифікувати проєкт серед існуючих рішень.

Результати розробки стратегії позиціонування наведені у таблиці 5.20.

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають формувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Забезпечення високої точності вимірювань, стабільної роботи системи та можливості вдосконалення	Стратегія диференціації	Інтеграція сучасних рішень для підвищення функціональності, технологічна адаптивність, універсальність, доступна ціна для широкого ринку	Точність Технологічність Інноваційність

Результати проведеного аналізу дозволили визначити ключові аспекти позиціонування стартап-проєкту на ринку. Основою обраної стратегії є диференціація, яка спрямована на підвищення функціональності та точності системи за доступною ціною. Такий підхід дозволяє проєкту відповідати потребам ринку, зберігаючи конкурентоспроможність завдяки сучасним технологіям та універсальності у використанні.

## 5.5. Розроблення маркетингової програми та планування реалізації стартап-проекту

У процесі створення маркетингової програми ключовим початковим етапом є формування концепції товару, що відповідає потребам та очікуванням цільової аудиторії. У контексті даного стартап-проекту це означає розробку унікальної системи стабілізації для безпілотного літального апарату, яка забезпечить високий рівень точності, функціональності та адаптивності. Підсумування проведеного аналізу конкурентоспроможності та виділення ключових характеристик системи наведено в таблиці 5.21.

Таблиця 5.21. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [31]

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або ті, що необхідно створити)
1	Універсальність використання	Забезпечення використання для різних цілей із можливістю легкої заміни модулів	Універсальність конструкції дозволяє інтегрувати систему у різні сфери, легко адаптуючи її до нових задач
2	Доступність цін та хорошої якості	Оптимізація витрат на виробництво забезпечує баланс між доступністю і функціональністю системи	Використання інноваційних підходів дозволяє знизити собівартість виробництва без втрати якості
3	Підтримка з FPV-дронами	Система може бути інтегрована з FPV-дронами для забезпечення стабільності під час польоту	Система адаптується під спеціальні потреби FPV-дронів, зберігаючи стабільність навіть у складних умовах.

Серед основних сильних сторін виділяється універсальність системи, що забезпечується її модульністю, та можливість адаптації до різних завдань. Такий підхід дозволяє продукту відрізнитися від конкурентів, більшість із яких не пропонують подібних рішень. Важливо, що ця адаптація та модифікація можуть бути здійснені без значних витрат, що додатково підвищує привабливість системи для потенційних споживачів.

Таблиця 5.22. Опис трьох рівнів моделі товару [30]

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Універсальна, модульна система стабілізації для безпілотних літальних апаратів середнього класу з можливістю адаптації під різні потреби користувачів. Система забезпечує точність вимірювань, стабільність та надійність		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Ор
	1. Універсальність	М	Тх
	2. Технологічність	М	Тл
	3. Надійність	М	Тх
	4. Модульність	М	Тх
	5. Економічність	М	Е
	Якість: IP67		
	Пакування: картонна коробка з ущільнювачем		
	Марка: StabiFly System		
III. Товар з підкріпленням	До продажу: перевірка модулів та комплектуючих, усунення можливих проблем		
	Після продажу: гарантійні зобов'язання, консультації та підтримки з підключенням		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Визначили основні технічні характеристики. Визначили стандарт якості для системи. Для забезпечення безпеки інтелектуальної власності передбачено впровадження патентного захисту. Надання гарантійних зобов'язань після продажу.

Таблиця 5.23. Визначення меж встановлення ціни [30]



№ 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	8000-16000	12000-20000	15000-35000	7000-100000

Для системи був обраний середній ціновий сегмент. Такий варіант є найбільш оптимальним, що мати можливість надавати якісний продукт та відповідний рівень контролю збуту.

Таблиця 5.24. Календарний план-графік підготовки стартап-проекту [30]

Стадія стартапу	Період запуску (за місяцями з початку підготовки проекту)					Вартість стадії
	1	2	3	4	5	
Передпосівна	16.12.24 22.01.25					-
Посівна		22.01.25 15.02.25				20000
Прототипування			15.02.25 30.04.25			80000
Закрита бетаверсія				30.04.25 15.05.25		100000
Ведення бізнесу					з 15.05.25	200000
Разом						400000

Після завершення план-графіку підготовки варто описати формування системи збуту таблиця 5.25

Таблиця 5.25. Формування системи збуту [30]

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Придбання для індивідуального використання або дрібних компаній, для військових цілей або дослідницьких організацій	Надання гарантійного обслуговування, консультацій щодо інтеграції системи, адаптація під спеціальні потреби	Нульового рівня	Пряма

Відповідно до сформованої таблиці, система збуту передбачає продаж продукції у невеликих та середніх обсягах, що відповідає загальним тенденціям галузі. Глибина каналу збуту обмежується нульовим рівнем, що свідчить про прямий зв'язок між виробником та кінцевим споживачем. Такий підхід дозволяє виробнику виступати не лише як постачальник товару, але й як основний надавач послуг з технічного обслуговування, підтримки та адаптації продукту відповідно до потреб клієнтів.

Останнім етапом при розробці маркетингової програми стартап-проекту є опис концепції маркетингових комунікацій таблиця 5.26

Таблиця 5.26. Концепція маркетингових комунікацій [30]

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Потребують стабільної, надійної та адаптивної системи стабілізації для БПЛА з можливістю швидкої заміни модулів	Інтернет, технічні блоги, публікації у професійних виданнях, соціальні мережі	Доступна ціна, Універсальність, висока точність	Показати переваги застосування системи перед поширеними аналогами	Модульний підхід до функцій системи

Визначаємо перелік витрат на запуск стартап-проєкту.

Таблиця 5.27. Початкові вкладення на запуск стартап-проєкту [30]

Види витрат	Вартість
НДДКР	5000
Захист прав на об'єкти інтелектуальної власності	10000
Створення робочого прототипу, проведення експериментальних досліджень	20000
Просування проєкту	50000
Витрати на утримання команди	40000
Закупівля обладнання	60000
Орієнтована собівартість першого продукту	10000
РАЗОМ	195000
Витрати які бере на себе стартапер	55000
Необхідні інвестиції	140000

Для виконання переліку цілей, необхідно залучення інвестицій у розмірі 140000 ум. од.

### Висновки до розділу 5

У даному розділі було розроблено концепцію стартапу, що базується на створенні системи стабілізації для безпілотних літальних апаратів із використанням ємнісного МЕМС-перетворювача. Розглянуто ключові аспекти, необхідні для реалізації проєкту, включно з аналізом цільової аудиторії, конкурентного середовища, ринкових можливостей, а також стратегій позиціонування та взаємодії з потенційними клієнтами.

На першому етапі проведено детальний аналіз ідеї, що передбачав вибір оптимальних технологічних рішень та вивчення конкурентних пропозицій на ринку. Виконано порівняльну оцінку характеристик аналогічних систем, у результаті чого визначено сильні сторони запропонованої системи, такі як висока

точність, універсальність завдяки модульності, надійність та здатність адаптації до різних умов використання.

Проведено дослідження ринкових можливостей, що включало визначення потреб цільової аудиторії та формування стратегій їх задоволення. Результати SWOT-аналізу дозволили систематизувати сильні та слабкі сторони, визначити перспективи розвитку та уникнути можливих ризиків. Особливу увагу приділено підходам до інноваційного позиціонування продукту на ринку, що базується на універсальності використання та впровадженні сучасних технологій.

Розроблено маркетингові стратегії просування продукту, які включають прямий збут через нульовий рівень каналу, що забезпечує ефективну комунікацію з клієнтами. Визначено концепцію маркетингових комунікацій, спрямовану на популяризацію системи через професійні видання, соціальні мережі та інші канали зв'язку.

Запропонована система трьох рівнів моделі товару дозволяє поєднати високі технічні характеристики із зручністю використання для різних категорій клієнтів. Впровадження системи здатне не лише підвищити ефективність безпілотних літальних апаратів, але й забезпечити її конкурентоспроможність на ринку завдяки модульності та адаптивності. Розроблена система стабілізації демонструє високу перспективність, відповідає сучасним тенденціям розвитку безпілотних технологій і може успішно інтегруватися в ринковий сегмент завдяки своїм технічним перевагам, продуманій маркетинговій концепції та стратегіям просування.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано дослідження використання ємнісних чутливих елементів у складі автоматизованих систем стабілізації та навігації для безпілотних літальних апаратів. Робота досягла поставленої мети, що полягала у розробці методів і підходів до вдосконалення ємнісних чутливих елементів, здатних забезпечувати високоточне вимірювання прискорення сили тяжіння, а також у створенні універсальної стабілізаційної системи. У першому розділі проведено аналіз основних сфер застосування БПЛА, їхніх навігаційних систем та принципів стабілізації. Розглянуто можливості інтеграції чутливих елементів для підвищення функціональності безпілотників. Особливу увагу приділено ємнісним чутливим елементам, їхнім перевагам і недолікам, а також перспективам використання у вимірювальних системах. Другий розділ зосереджено на дослідженні принципів роботи ємнісних чутливих елементів, їхньої конструкції та створенні математичної моделі двоканального чутливого елемента. Побудовано функціональні та структурні схеми автоматизованих гравіметричних систем (АГС), що доводять ефективність двоканальної конструкції для усунення інструментальних похибок та вертикальних збурень. Третій розділ містить детальний аналіз похибок чутливого елемента, включно з проблемою дрейфу нульового пункту. Запропоновано методи для зменшення похибок і забезпечення стабільної роботи системи. Розроблено концепцію трикоординатного ємнісного гравіметра з багатоканальною архітектурою, що підвищує точність вимірювань навіть у динамічних умовах. У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження двоканального чутливого елемента, зокрема перевірку стійкості системи за критеріями Гурвіца та Найквіста. Експериментально доведено, що розроблена система забезпечує високу точність вимірювань із похибкою, що не перевищує 0,5 мГал навіть за умов резонансу, підтверджуючи її надійність. У п'ятому розділі розроблено концепцію стартапу, спрямованого на впровадження системи стабілізації БПЛА з використанням ємнісного МЕМС-перетворювача. Проаналізовано ринкові можливості, виконано

SWOT-аналіз, розроблено маркетингові стратегії та визначено конкурентні переваги продукту, такі як висока точність, універсальність і адаптивність.

Результати дослідження мають практичну цінність. Запропоновані методи і засоби розробки можуть бути використані для вдосконалення стабілізаційних систем БПЛА та виконання гравіметричних досліджень із високими вимогами до точності. Робота відкриває перспективи подальших досліджень у напрямку інтеграції нейромережових підходів і розширення функціональних можливостей стабілізаційних систем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бегов А.А. Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації [Електронний ресурс] / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Режим доступу: <https://asnk.kpi.ua/index.php/studentu/biblioteka-2/54-anotatsii/spetsialisty/896-biehov-aa-dvokanalnyi-iemnisnyi-mems-chutlyvyi-element-avtomatyzovanoi-systemy-stabilizatsii>
2. Міністерство оборони України. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України. Наказ z0031-17 від 08.12.2016, № 661. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> (дата звернення: 04.10.2024);
3. PD-2 [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/PD-2> (дата звернення: 12.10.2024).
4. UkrSpecSystems. Серія ГОЕС USG-400 EO/IR/LRF [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukrspecsystems.com/uk/gimbals/usg-400> (дата звернення: 12.10.2024).
5. UkrSpecSystems. Геодезична аерофотозйомка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukrspecsystems.com/uk/pd-2-uas-applications/geodetic-aerial-photography> (дата звернення: 15.10.2024).
6. Мурайов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. 2023. №2(1). С. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>
7. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
8. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень/ О.М. Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 261 с.

9. Козько К. С. Ємнісний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: дис... канд. техн. наук. : 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин / Костянтин Сергійович Козько. - Київ, 2016. - 223 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15358>
10. Хильченко Т.В. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: дис. ... канд. техн. наук. : 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин / Т.В. Хильченко. Одеса, 2019. – 228 с.
11. Безвесільна, О. М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник [Текст] / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 700 с.
12. Безвесільна О.М. Аналіз основних типів гравіметрів АГС / О.М. Безвесільна, Л.О. Чепюк // ВІСНИК ЖДТУ. 2013. № 3 (66), с. 52-61.
13. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
14. UVS International = Міжнародної асоціації безпілотних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://uvsinternational.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=204&Itemid=284](http://uvsinternational.org/index.php?option=com_content&view=article&id=204&Itemid=284)
15. Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Л.О. Чепюк, К.С. Козько // Геофизический журнал. - 2015. - Т. 37, № 2. - С. 86-94. - Бібліогр.: 16 назв. - укр. DOI: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111309>. (дата звернення: 14.10.2024);
16. Безвесільна О.М., Гравіметр авіаційної гравіметричної системи нового типу / О.М. Безвесільна, К.С. Козько, 2014.
17. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння: пат. 105122 Україна: МПК G01V 7/00 /



- Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Козько К. С. – заяв. 01.04.13; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. – 5 с.
18. Безвесільна О.М., Красниця Є.М. Ємнісний МЕМС чутливий елемент стабілізатора озброєння // Матеріали конференції. Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2017. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/11/114.pdf> (дата звернення: (17.10.2024).
19. Коротченко Н.П., Безвесільна О.М. Конструкція оптичного акселерометра. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 11-12 грудня 2013. С. 100-101;
20. Коваленко, І. О. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. посібник / І.О. Коваленко, А. М. Коваль. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 652 с.
21. Головка, Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головка, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник – К.: Либідь, 2001. –407 с.
22. Іващенко, О. А. Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Іващенко Олена Андріївна. - Київ, 2018. - 127 с.
23. Безвесільна, О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі Житомир: ЖДТУ, –пристрої приладів: підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. 812 с.–2012.
24. Безвесільна О. М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2017. – 181 с.
25. Безвесільна О., Ткачук А., Чепюк Л., Нечай С., Хличенко Т. Виведення принципу побудови авіаційної гравіметричної системи з будь-яким типом гравіметра // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2017. Т. 1. №7 (85). С. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92941>

26. Биковський А.В., Полинков А.В., Арсен'єв В.Д. Аерогравіметричний метод вимірювання гравітаційних аномалій / Биковський А.В., Полинков А.В., Арсен'єв В.Д. // Авіакосмічне приладобудування – 2013. №12. – С. 11–19.
27. Безвесільна, О.М. Компенсація інструментальних похибок низькочастотного гравіметра авіаційної гравіметричної системи шляхом використання методу двоканальності / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук, В.В. Пономаренко, Т.В. Хильченко // Вісник інженерної академії України. – №3. – 2015. – С. 26-30.
28. Патент на винахід 113033, Україна, МПК G01V 7/06 (2006.01). Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи / Безвесільна О.М., Ткачук А. Г., Хильченко Т.В., Бичук Р.В. – № а 2015 09858; заяв. 11.04.2016; опубл. 25.11. 2016, Бюл. № 22.
29. Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Чепюк Л. О. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння : пат. № 111875 UA / Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Чепюк Л. О. ; Житомирський державний технологічний університет. – № а201408598 ; заявл. 28.07.2014. – Опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. – 12 с.
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.