

**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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-науковою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології  
проектування приладів»**

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

на тему: «Дослідження двоканального ємнісного МЕМС чутливого елемента  
автоматизованої вимірювальної системи з елементами штучного інтелекту»

Виконав студент II курсу, групи ПМ-01мн  
Віталій НІЧИК \_\_\_\_\_

Науковий керівник  
д.т.н., проф., професор кафедри АСНК  
Олена БЕЗВЕСІЛЬНА \_\_\_\_\_

Консультант з «Розробки стартап-проектів»  
д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики  
Катерина БОЯРИНОВА \_\_\_\_\_

Рецензент  
д.т.н., проф., професор кафедри ІВТ  
Наталія ЗАЩЕПКІНА \_\_\_\_\_

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

Київ – 2022 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-наукова програма Комп'ютерно-інтегровані технології

проекування приладів

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ **Юрій КИРИЧУК**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Нічику Віталію Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження двоканального ємнісного МЕМС чутливого елемента автоматизованої вимірювальної системи з елементами штучного інтелекту.

науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна д.т.н., проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «19» травня 2022 р. №НС–300–2022

2. Строк подання студентом дисертації 10.06.2022 р.

3. Об'єкт дослідження Процес вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи з елементами штучного інтелекту на основі нового сучасного мікроелектромеханічного двоканального ємнісного гравіметра.

4. Предмет дослідження (вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Комп'ютерно-інтегрована автоматизована гравіметрична система на основі двоканального ємнісного МЕМС гравіметра з елементами штучного інтелекту.

5. Перелік завдань, які потрібно: провести огляд та аналіз існуючих безпілотних літальних апаратів, авіаційних гравіметрів; розробити математичну модель двоканального ємнісного гравіметра в умовах руху установки; обґрунтувати вибір двоканального ємнісного гравіметра як чутливого елемента системи; розробити автоматизовану гравіметричну систему на основі двоканального ємнісного гравіметра з елементами штучного інтелекту; зробити висновки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Схеми та кресленики автоматизованої гравіметричної системи.

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття в збірнику праць XIII Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», стаття у журналі «Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки»

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Бояринова К.О., д.е.н., професор, завідувач кафедри економічної кібернетики		

9. Дата видачі завдання 08.03.2022 року.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд і аналіз існуючих безпілотників, авіаційних гравіметрів, гравіметричних систем	08.03.2022 – 04.04.2022	
2	Розробка математичної моделі роботи двоканального ємнісного МЕМС гравіметра	05.04.2022 – 25.04.2022	
3	Розробка проекту автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту	26.04.2022 – 16.05.2022	
4	Оформлення стартап-проекту	17.05.2022 – 25.05.2022	
5	Висновки та оформлення дисертації	26.05.2022 – 06.06.2022	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

Віталій НІЧИК

(ім'я, прізвище)

Олена БЕЗВЕСІЛЬНА

(ім'я, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

## РЕФЕРАТ

**Магістерська дисертація на тему:** «Дослідження двоканального ємнісного MEMC чутливого елемента автоматизованої вимірювальної системи з елементами штучного інтелекту» містить: 96 с., 32 табл., 22 рис., та 48 джер.

**Об'єкт дослідження:** процес вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом створення комп'ютерно-інтегрованої системи з елементами штучного інтелекту на основі нового сучасного мікроелектромеханічного двоканального ємнісного гравіметра.

**Предмет дослідження:** автоматизована гравіметрична система з елементами штучного інтелекту.

**Мета роботи:** підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом розробки та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи з елементами штучного інтелекту на основі нового сучасного мікроелектромеханічного двоканального ємнісного гравіметра.

### **Результати роботи та їх новизна:**

1. Розроблено схему автоматизованої гравіметричної системи на основі безпілотного літального апарата, що використовує як чутливий елемент ємнісний MEMC гравіметр, а обробка сигналу відбувається з використанням штучного комп'ютерного інтелекту;

2. Обгрунтовано використання та наведений приклад використання штучного комп'ютерного інтелекту для обробки вхідного сигналу та отримання чіткої відповіді на виході.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи:** Розроблена система може бути використана у при проведенні геологорозвідувальних робіт з використанням гравіметричної розвідки місцевості.

**Ключові слова:** БПЛА, гравіметрична система, MEMC, штучний інтелект, гравіметр, нечітка логіка, ємнісний гравіметр, ДЄГ.

## ABSTRACT

Master's dissertation on the topic: " Investigation of two-channel capacitive MEMS sensitive element of automated measuring system with elements of artificial intelligence " contains: 96 pages., 32 tables, 22 figures, 48 appendices.

Object of research: The process of measuring the acceleration of gravity by creating a computer-integrated system with elements of artificial intelligence based on a new modern microelectromechanical two-channel capacitive gravimeter.

Subject of research: automated gravimetric system with elements of artificial intelligence.

Purpose: to increase the accuracy and speed of gravity acceleration measurements by developing and researching a computer-integrated system with artificial intelligence elements based on a new modern microelectromechanical two-channel capacitive gravimeter.

The results and their novelty:

1. Developed a scheme of automated gravimetric system based on unmanned aerial vehicle, which uses as a sensitive element capacitive MEMS gravimeter, and signal processing is using artificial computer intelligence;
2. The use is substantiated and an example of using artificial computer intelligence to process the input signal and obtain a clear response at the output is given.

Recommendations for the use of the results of the work: The developed system can be used in geological exploration works using gravimetric survey of the area.

**Keywords.** *UAV, MEMS*, artificial intelligence, gravimeter, fuzzy logic, capacitive gravimeter, two-channel capacitive gravimeter.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 КЛАСИФІКАЦІЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. АНАЛІЗ СТАНУ СУЧАСНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРІЇ.....	15
1.1. Загальні характеристики БПЛА .....	15
1.2. Конструкція БПЛА.....	16
1.3. Військові безпілотники.....	19
1.3.1. MQ-1 Predator.....	19
1.3.2. Bayraktar TB2.....	20
1.4. Цивільні безпілотники.....	22
1.5. Вимоги точності до сучасних гравіметричних систем.....	24
1.6. Аналіз існуючих авіаційних гравіметрів.....	25
1.6.1. Гіроскопічні гравіметри.....	25
1.6.2. П'єзоелектричні гравіметри.....	27
1.6.3. Ємнісні гравіметри.....	28
1.7. Висновок до першого розділу.....	29
РОЗДІЛ 2 ЄМНІСНИЙ МЕМС ГРАВІМЕТР. ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ ГРАВІМЕТР ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ .....	30
2.1. Ємнісний гравіметр. Огляд патентної бази .....	30
2.2. Ємнісний МЕМС гравіметр .....	31
2.3. Двоканальний ємнісний гравіметр. Математична модель.....	33
2.3.1. Конструкція МЕМС двоканального ємнісного гравіметра.....	33
2.3.2. Математична модель руху ДЄГ за умов розташування установки на Землі.....	35
2.3.3. Рівняння руху ДЄГ в за умови рухомої основи.....	38

2.3.4. Рівняння руху двоканального ємнісного гравіметра для моделювання на комп'ютері.....	40
2.3.5. Структурна схема двоканального ємнісного гравіметра....	43
2.4. Розрахунок фізичних параметрів МЕМС гравіметра.....	45
2.5. Висновок до другого розділу.....	46
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО ГРАВИМЕТРА.....</b>	<b>47</b>
3.1. Дослідження стійкості двоканального ємнісного гравіметра.....	47
3.1.1. Дослідження стійкості системи за критерієм Найквіста....	48
3.1.2. Дослідження стійкості системи за критерієм Гурвіца.....	49
3.2. Опис експериментальної установки .....	49
3.2.1. Досліджуваний ДЄГ.....	50
3.2.2. Градувальна характеристика ДЄГ.....	50
3.2.3. Визначення базових параметрів роботи макету моделі.....	52
3.2.4. Проведення експерименту.....	53
3.2.5. Результати дослідження МЕМС ДЄГ.....	55
3.2.6. Метрологічні характеристики гравіметра.....	55
3.2.7. Дослідження параметрів ЧЕ за допомогою вібростенда....	56
3.3. Висновок до третього розділу.....	57
<b>РОЗДІЛ 4 АВТОМАТИЗОВАНА ГРАВИМЕТРИЧНА СИСТЕМА З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ .....</b>	<b>58</b>
4.1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій.....	58
4.2. Опис запропонованої автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин .....	61
4.3. Висновок до 4 розділу.....	67

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО МЕМС ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ» .....	68
5.1. Опис ідеї та технологічний аудит проекту.....	68
5.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	71
5.3. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	80
5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	83
5.5. Висновок до 5 розділу.....	89
ВИСНОВОК.....	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	92



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

1мГал	– 1мГал = $10^{-5}$ м/с <sup>2</sup> (1Гал = $10^{-2}$ м/с <sup>2</sup> = 1 см/с <sup>2</sup> )
БПЛА	– безпілотний літальний апарат
БЦОМ	– бортова цифрова обчислювальна машина
ГГ	– гіроскопічний гравіметр
ГСП	– гіростабілізована платформа
ДЕ	– демпфуючий елемент
ДЕГ	– двоканальний ємнісний гравіметр
ЄГ	– ємнісний гравіметр
ЛА	– літальний апарат
МЕМС	– мікроелектромеханічна система
ПЕ	– пружний елемент
ПСТ	– прискорення сили тяжіння
ПГ	– п'єзогравіметр
СГ	– струнний гравіметр
ЧЕ	– чутливий елемент
$d_i$	– п'єзоелектричний модуль
$f_z$	– вихідний сигнал ПГ
$g_z$	– проекція ПСТ на вісь чутливості ПГ
$\ddot{h}$	– вертикальне прискорення ЛА
$\xi$	– коефіцієнт демпфування
$\omega_0$	– власна частота ПГ
$\gamma_0$	– довідкове значення ПСТ
$\Delta g$	– аномалія прискорення сили тяжіння

## ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) з кожним роком набувають все більше значення як у військовій, так і у цивільній сфері. На думку багатьох експертів безпілотна авіація у найближчому майбутньому буде домінувати у небі. Уже існує велика кількість військових БПЛА, що якісно відрізняються від апаратів, що керуються людиною.

Переваги включають: відсутність екіпажу, відносно низькі витрати на виробництво, малі експлуатаційні витрати на підтримку працездатного стану.

Сьогодні безпілотники або дрони широко використовуються у багатьох країнах у різних галузях господарства. Вони є одним із перспективних напрямків розвитку наукового та технічного процесу багатьох розвинутих держав.

За даними міжнародної асоціації безпілотних систем UVS International [1] у 2013 році БПЛА виготовляли у 57 країнах світу. Це зумовлено недоцільністю, неможливістю, неекономічністю виконання специфічних завдань за допомогою пілотованих людиною апаратів. А швидкий розвиток та широкий спектр використання безпілотників суттєво значно підвищують попит на дослідження, розробку, удосконалення БПЛА.

До завдань БПЛА, що не можуть бути виконані з тією ж якістю пілотованими об'єктами належать:

- контроль комунікацій та кордонів;
- дистанційне зондування Землі;
- ретрансляція сигналів;
- моніторинг повітряного простору;
- розвідувальні роботи
  - розвідка повітряного, водного, наземного простору;
  - хімічна, біологічна, радіаційна розвідка;
  - радіотехнічна розвідка;
- транспортно-логістичні задачі.

Підвищення попиту на БПЛА за останнє десятиліття підтверджує актуальність БПЛА.

Науково-технічний процес швидко рухається вперед за рахунок великої кількості різноманітних досліджень і винаходів, що стали доступні через значні технологічні успіхи:

- поява нових матеріалів, що на відміну від нині існуючих, мають перевагу у масі та міцності, наприклад, композити;
- швидкий розвиток поновлюваних джерел енергії, в основному на базі літій-полімерних акумуляторів;
- розвиток супутникових систем навігації та позиціонування(GPS);
- розвиток комп'ютерної інформаційно-обчислювальної техніки, поява нових алгоритмів, систем та інтерфейсів;
- розвиток у сфері мікроелектромеханічних компонентів, до яких відносяться: системи навігації, орієнтації та стабілізації, мікроконтролери, приймачі та створювачі радіосигналів,.

Швидкий розвиток у мікроелектромеханічній галузі дає можливість створювати високоточні прилади зі зменшеними розміром та масою, які можуть бути успішно застосовані при розробці та удосконаленні сучасних навігаційних комплексів (НК) для безпілотників. Наразі, доволі актуальне питання з використання такого НК для вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ), або аномалії Буге, тобто, гравітаційної аномалій Землі дані яких доцільно використовувати для налаштування та корекції інерціальних систем навігації та позиціонування. Точні значення гравітаційного прискорення ( $g$ ) Землі використовуються у багатьох розвинутих галузях науки та техніки. До таких можна віднести космічну та авіаційну. Окрема галузь використання географічних даних це розвідка корисних копалин, що за умови виконання на БПЛА може проводитись у важкодоступних для людини районах (гірські масиви, акваторії морів та океанів, погано розвинені на магістральну інфраструктуру регіони) та ін., Використання БПЛА також дозволяє суттєво зменшити витрати. Сучасна гравірозвідка потребує

застосування сучасних та інноваційних технологічних підходів до отримання подальшої обробки точних гравіметричних даних. Оскільки задача полягає в режимі реального часу прийняти рішення про наявність в надрах певної кількості корисних копалин, які маючи різну густину та об'єм запасу і знаходячись на абсолютно різній глибині можуть створювати майже однакові аномалії прискорення вільного падіння. Тому стоїть задача використання у сучасних гравіметричних системах нових прецизійних гравіметрів. Важливою частиною при розробці нового БПЛА є його система стабілізації, оскільки використання БПЛА у екстремальних умовах потребує саме точної стабілізації для покращення керування.

Система стабілізації безпілотної літака може складатись із однієї а інколи декількох(в основному п'яти) гіростабілізованих платформ (ГСП).

У даній роботі, основним чутливим елементом, що входить до складу автоматизованої системи стабілізації (СС) буде являться пристрій для вимірювання ПСТ, а саме двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр(ДЕГ), який встановлюється на розроблюваній ГСП.

Довга обробка результатів, що зазвичай складає до декількох місяців, недостатня точність та швидкодія існуючих гравіметрів виводять питання розробки нового гравіметра на новий рівень. Перспективним напрямом є побудова на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Одним із відомих на сьогодні перспективних гравіметрів є одноканальний ємнісний гравіметр(ЄГ). Проте інструментальні похибки та похибки вертикального прискорення мають значну роль у вихідному сигналі гравіметра. Використання двоканальної схеми (ДЕГ) забезпечує усунення інструментально похибки, а також похибки дії вертикального прискорення, що дозволяє підвищити точність, чутливість. Малий розмір мікроелектромеханічних компонентів забезпечує економічність та практичність у використанні систем на його основі. І зважаючи на перспективність, яку сьогодні має ДЕГ доцільним є його подальше вивчення та дослідження.

## РОЗДІЛ 1

### КЛАСИФІКАЦІЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ. АНАЛІЗ СТАНУ СУЧАСНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВИМЕТРІЇ

#### 1.1. Загальні характеристики БПЛА

Безпілотники, або безпілотні літальні апарати (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) – це повітряні літальні апарати, які не керуються людиною, що безпосередньо знаходиться всередині. Іншими словами, це пристрій, який дозволяє пілоту літати, не перебуваючи на борту. Управління здійснюється дистанційно по радіо або автономно (за заздалегідь визначеним маршрутом). Перевагами дронів є те, що вони мають короткий час введення в експлуатацію а також відсутність потреби у додатковій інфраструктурі. Наприклад, можуть виконувати зліт та посадку без спеціально підготовленої злітної смуги, яка є обов'язковою для більшості звичайних пілотованих апаратів. До попередників БПЛА, в основному можна віднести військові прототипи, що застосовувались у критичних місцях і забезпечували відсутність втрати пілотів при невдачі. Першими розпочали досліджувати перспективний безпілотний напрям такі країни: США, Німеччина, Великобританія та Ізраїль. Перший БПЛА використовувався Австрією у 1849р. Це були повітряні кулі, наповнені вибуховою речовиною, що використовувалися як бомби[2]. Одним із перших творців безпілотників був Чарльз Кеттерінг, який у співпраці з Елмером Сперрімом, Орвіллом Райт та Робертом Міліканем створив у 1915 році літак, названий «KetteringBug». Це був примітивний автоматичний літак, який на основі датчиків визначав його висоту (за допомогою барометра), пройдену відстань (виходячи з кількості обертів двигуна) та положення [3].

Перший цивільний беспілотник був виготовлений лише у 80-х роках ХХ ст. у Японії. На відміну від військових, які працюють переважно на двигунові внутрішнього згорання, цивільні використовують електромотор[3].

## 1.2. Конструкція БПЛА

Основним елементом БПЛА є корпус, що має відповідати стандартам обтікання форми а також мати мінімальну вагу. Відповідно від призначення та характеру виконуваних робіт БПЛА можуть мати різні конструкції корпусу, а також різну кількість та місця розташування двигунів.

Основною рушійною силою дрона є двигуни та гвинти. Крутний момент, що створює двигун, за допомогою гвинта перетворюється на потік напрямленого повітря, яке може підіймати апарат. БПЛА за компонованням двигунів можна класифікувати як(рис. 1.1.):

- Двогвинтові – один провідний гвинт;
- Х-подібні – найбільш поширена конструкція, провідними є два гвинти;
- Y-подібні – три гілки, складені в латинську букву «Y», де провідними можуть бути одна або дві гілки;
- V-подібні – рідкісне компоновання двигунів, при якому провідні два гвинти. Розташування двигунів схоже на латинську літеру «V»;
- Н-подібні – рідкісне компоновання, розташування двигунів із двома провідними у формі латинської літери «H».

Поділити БПЛА за кількістю двигунів можна на такі групи[4]:

- Бікоптери – два двигуни;
- Трикоптери – три двигуни;
- Квадрокоптери – чотири двигуни;
- Гексакоптери – шість двигунів;
- Октокоптери – вісім двигунів.

Подвійні гвинти (зверху та знизу від балок кріплення до корпусу) можуть покращити конструкцію. Вони не лише збільшують максимальну корисну

тягу апарата, що призводить до відповідно збільшення корисного навантаження, а і додають жорсткості всій конструкції, що за критичних умов використання є важливою перевагою. За рахунок обертання в різні напрямки, подвійні гвинти забезпечують врівноваження інерційної сили, що призводить до врівноваження. Проте у БПЛА є не лише переваги, а й недоліки. До мінусів можна віднести живлення апарату. Оскільки основним елементом у більшості дронів є батарея, то можна зробити висновок, що час польоту апарату дуже обмежений. Зменшення заряду батареї провокує сповільнення обертання двигунів, та відповідно зменшення висоти, дальності польоту та маневреності. Зазвичай батареї це сукупність з декількох з'єднаних між собою гальванічних елементів одного типу.

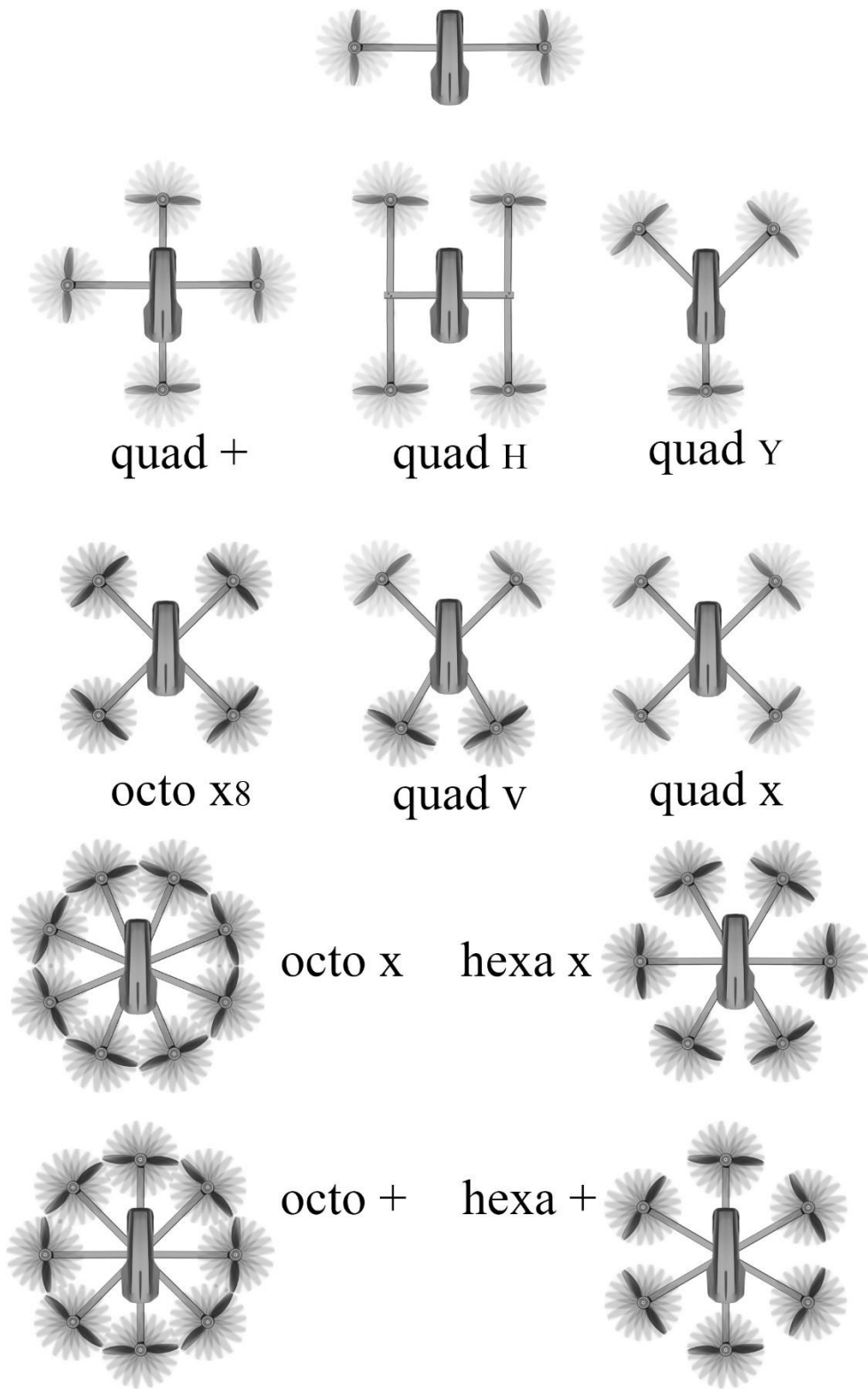


Рис. 1.1. Варіанти компоунвання двигунів



### 1.3. Військові безпілотники

Існування безпілотників по часу таке ж давнє, як і літаків, Думки про збереження людських життів і небезпечність польоту існували з самого початку розвитку літальної техніки. Однією із найрозвиненіших у галузі побудови безпілотників є США. Деякі спроби активно використовувати БПЛА американці вводили ще в часи Другої світової війни. Та аж у 1991 році у Перській затоці безпілотники показали себе в дії, зокрема в операції «Буря в Пустелі» (17.01-23.02.1991 р.). Дрони виконували важливі розвідувальні місії.

#### 1.3.1. MQ-1 Predator

Типовим прикладом військового безпілотника є MQ-1 Predator (М – багатоцільовий, Q – дрон ), який відноситься доUCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle).



Рис. 1.2. Багатоцільовий БПЛА MQ-1 Predator[5]

Основною задаче цього літального апарату є військова розвідка, тому основний акцент зроблений на високоякісних камерах високої роздільної здатності та тепловізорах. Компоненти дрону такі[3]:

- Чотирициліндровий двигун внутрішнього згорання Rotax, потужністю 115 кінських сил;
- Антена зв'язку Ku-діапазону;
- Дві внутрішні GPS-антени та GPS-навігаційна система;
- Набори паливних елементів;
- Набір камер та кодерів;
- Слот для передавача, приймача та радіолокаційної антени.

Дрон є частиною комплексу, що включає[3]:

- Чотири безпілотники типу RQ-1 або MQ-1;
- Наземну станцію управління, яка зазвичай розміщується у транспортному засобі, де знаходиться пілот, а також оператор датчиків.

### **1.3.2. Bayraktar TB2**

З початку російсько-Української війни кожен українець знає про Байрактар. Чудо-зброю яка знищує сотнями ворожу техніку. А починалось все із заборони на поставку Туреччині американських бойових багатоцільових БПЛА. За 7 років приватна турецька компанія Baykar Makina змогла розробити ефективний безпілотник якому наразі немає рівних.

Корпус виготовлений з вуглецевого волокна. БПЛА оснащений двигуном внутрішнього згорання з дволопатеvim гвинтом. Двигун розташований між хвостовими балками, паливо зберігається в гнучких резервуарах. Кожна система Bayraktar TB2 складається з 6-ти літальних апаратів, двох наземних станцій керування (GCS), трьох наземних терміналів даних (GDT), двох дистанційних відеотерміналів (RVT) і обладнання наземної підтримки. БПЛА оснащений системою авіоніки з потрійним резервуванням і системою автоматичного зльоту та посадки. Здатний виконувати завдання в автоматичному та напівавтоматичному режимах[6,7]. За сприятливого вітру

може зависати на місці [вікіпедія]. На відміну від пілотованих літаків, не потребує довгих злітно-посадкових смуг і спеціальних ангарів для зберігання.[7]



Рис. 1.3. Ударний оперативно-тактичний БПЛА Bayraktar TB2[9]

БПЛА Bayraktar TB2 керується з наземної станції, яка перевозиться автомобілем. Її оснащено стелажними шафами, блоком кондиціонування повітря, системою фільтрації повітря NBC, блоками живлення, системами бездротового зв'язку та системами внутрішнього зв'язку[6,7]. Станції здатні перехоплювати керування безпілотниками одна одної, що дозволяє швидко змінювати тактику. Оперативний радіус дії дронів рахується не від точки старту, а від найближчої станції керування і контролю або від ретранслятора сигналів.[8]

Основні характеристики БПЛА Bayraktar TB2[9]

- Довжина: 6,5 м;
- висота: 2,2 м;
- розмах крил: 12 м;
- максимальна злітна маса: 650 кг;
- вантажопідйомність: 150 кг (з них 55 кг оптико-електронна станція);

- максимальна швидкість: 222 км/год.;
- крейсерська швидкість: 130 км/год.;
- радіус зв'язку з центром керування: 150 км, оновлена версія – до 300 км;
- стеля: 8200 м;
- автономність: 27 год.;
- паливо: 300 л бензину;
- оператори: 3 людини наземного центру керування

#### **1.4. Цивільні безпілотники**

До цивільних безпілотників можна віднести DJI Phantom Vision 2, що використовується любителями фото- та відеозйомки. Для живлення апарат використовує літій-полімерний акумулятор загальною масою 1160 г. та ємністю 5200 мАг. Даного джерела живлення апарату вистачає на політ та зйомку протягом 25 хв.[10]



Рис. 1.4. Квадрокоптер DJI Phantom Vision 2[10]

Управління здійснюється за допомогою радіохвиль на частоті 5,8 ГГц, а дальність управління складає 300 м. Пристрій укомплектований автоматичним

повернення на вихідну точку, внаслідок втрати зв'язку з пультом управління. Знайти початкову точку злету досягає GPS-приймач із спеціальним програмним забезпеченням. Основною моніторинговою складовою БПЛА – є камера, яка має роздільну здатність 14 Мп. Дрон також може бути обладнаним спеціальним програмним забезпеченням для проведення картографічних робіт у важкодоступних регіонах.

У таблиці 1.1. описано порівняння двох типів безпілотників: військового та цивільного[4,9,10].

Таблиця 1.1.[4,9,10]

### Порівняння дронів

<b>Feature</b>	<b>DJI Phantom View 2</b>	<b>MQ-1 Predator</b>	<b>Bayraktar TB2</b>
Розмір (довжина × ширина × висота)	0.29 м. × 0.18 м. × 0.12 м.	8.23 м. × 14.84 м. × 2.21 м.	6.5 м. × 12 м. × 2.2 м.
Без навантаження / стартова маса	1.36/2.6 кг	512/1020 кг	400/650 кг
Тривалість польоту	25 хв.	24-40 год	24 год
Тип приводу	Електричний / Пропелерний	Дизель / Пропелерний	Бензин / Пропелерний
Тип двигуна	Чотири електричні двигуни	Чотири поршневих двигуна Rotax 914 (115 к.с.)	Один чотирьох-циліндровий двигун Rotax 912-iS (100 к.с.)
Дальність дії	0,3 км	726 км	300 км
Максимальна швидкість	54 км / год	217 км / год	220 км/год

Довжина злітно-посадкової смуги	0 м (вертикальний зліт)	1500 м	
Екіпаж	1 людина	2-3 особи	3 особи
Ціна	800 \$	4 млн. \$ / 20 млн. \$	1 – 2 млн. \$ в залежності від комплектації

### 1.5. Вимоги точності до сучасних гравіметричних систем

До складу сучасних гравіметричних систем входить таке обладнання [11]:

1. Основним компонентом гравіметричної системи (ГС) є авіаційний гравіметр. Він має мати високу стабільність до вібрації, нульового сигналу на протязі всього часу роботи, частоту видачі вихідних даних. За недотримання точності вертикальної орієнтації, є ризик суттєвого збільшення похибки, оскільки горизонтальні прискорення руху апарата будуть спроектовуватись на вимірювальну вісь гравіметра. Тому таку задачу, як стабілізація вертикальної осі виконує гіростабілізована платформа.

2. Гіростабілізована платформа (ГСП) має забезпечувати точну стабілізацію гравіметра на протязі всього польоту. Похибка не повинна складати більше 30-40 кут. секунд за весь час роботи. Щоб зменшити похибки спричинені відбрацією БПЛА, платформу встановлюють у положенні близькому до центру мас приладу, а також застосовують демпфований підвіс.

3. Навігаційна система використовується для визначення висоти та розташування, складається із приймача та антени. Забезпечує поправки висоти а також Коріолісового прискорення.

4. Блок прийняття рішень та запечпечення до нього. Для прийнятті рішень використовується мікрокомп'ютер, для забезпечення якого необхідно мати живлення, а саме блок акумуляторних батарей.

5. БПЛА – може бути як керований людиною, так і автопілотом. Літальний апарат може працювати і за принципом літака-планера, так і дрона. Важливим компонентом є точний автопілот, що забезпечує рух відповідно плану по визначених координатах.

6. Для забезпечення автопілоту необхідні базові супутникові станції навігації. Вони можуть працювати у диференціальному режимі, забезпечуючи зв'язок зі супутником, та передаючи на апарат точне місцезнаходження.

Можливість проведення гравіметричних досліджень за допомогою авіації можливе з високої точності гравіметра на борту. Так ь. Так, у 1995 р. проф. В. Р. Грамертом [12] та Дж. К. Харісоном [13] у США, показали, що авіаційні гравіметричні роботи будуть доцільними лише тоді, коли точність АГС буде рівною 2 мГал [14]. А проф. Дж. Ханнахом (Університет Отаго, Нова Зеландія) у 2001 р. показав, що вищезгадана точність досягається лише за рахунок здійснення десятків польотів за однаковим маршрутом.

Основи метрологічного забезпечення гравірозвідки були сформовані ще у 50-70-х роках ХХ ст [15]. Основним критерієм точності є саме точність гравіметра, тобто для збільшення точності автоматизованох гравіметричної системи – необхідно підвищити точність гравіметра.

## **1.6. Аналіз існуючих авіаційних гравіметрів**

Розглянемо деякі типи найбільш перспективних типів гравіметрів.

### **1.6.1. Гіроскопічні гравіметри**

Гіроскопічний гравіметр складається із гіроскопічної пластини та маятника, що приєднаний осевим підвісом, який є перпендикулярним до осі обертання гіроскопа. Основною задачею є забезпечення точності при виставленні осі чутливості гравіметра відносно Землі. На кафедрі приладобудування НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом Безвесільної О.М. розроблено та досліджено ГГ на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень - гіроскопічний вимірювач лінійного

прискорення (ГІЛП), зображений на рис.1.5. Він складається з берилієвого ротору 2, який є елементом гіромотору 1. Розташування якого забезпечує маятниковість відносно осі внутрішнього підвісу 12. Поворотна платформа 6 виконує роль зовнішньої рамки. На ній розміщено стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі внутрішнього підвісу гіромотору 12, до якої прикріплено ротор датчика 3 кута  $\beta$  повороту гіромотору. На платформі 6 встановлено статор датчика 3. Для гасіння кутових коливань конструкцією передбачено рідинний демпфер 5. Сигнал з датчика 3 підсилюється і направляється на датчик моменту 7. Обертний момент є пропорційним до кута  $\beta$ . Світло непроникнена мембрана 10, розташована на поворотній платформі 6, радіально зміщена і має щілину, через яку надходить світло з джерела 11. При проходженні світлового променя над фотоприймачем 8, виникає короткий імпульс, що означає повний оберт поворотної платформи 6 навколо осі 12. Точність відліку рівна 5 мкрад. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) надходить до блока електронних лічильників через підсилювач 9. Додатковий магнітний захист забезпечується алюмінієвим захисним корпусом. Недоліками є складність конструкції, наявність збурюючих моментів обертання та необхідність точної калібровки чутливої осі гравіметра[11,16].

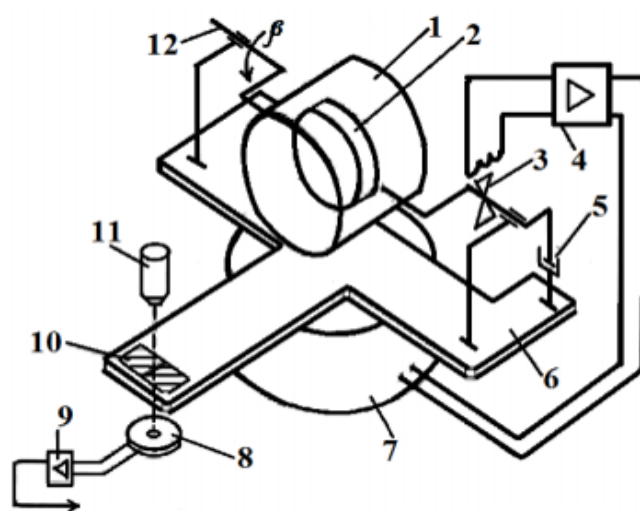


Рис.1.5. Гірогравіметр[16]



### 1.6.2. П'єзоелектричні гравіметри

У приладі використовуються п'єзоелектричні кристали, що мають прямий та зворотній п'єзофект. П'єзофект це процес виникнення заряду на гранях пластини з п'єзоматеріалу. Знак та величина заряду залежать від типу деформації, позитивний та негативний заряди замінюють одне одного при розтягу та стисненні. Тому п'єзоелектричні перетворювачі не можливо використовувати при вимірюванні статичних процесів, з часом напруга на виході падає. Зворотній п'єзофект це деформація пластини пропорційна до величини електричного поля в яке поміщено пластину із п'єзоматеріалу.

На кафедрі приладобудування КПІ ім.Ігоря Сікорського під керівництвом Безвесільної О. М. розроблено та досліджено п'єзоелектричний гравіметр (ПГ), зображений на рис.1.6. П'єзопакет 1, що складається із шарів кристалічного ніобату літію, є чутливим елементом. На торцях п'єзопакету розміщені ізолятори 2 та маса 3. Чутливий елемент притиснений до основи 4 гвинтом 6, щоб покращити стійкість та міцність конструкції. Кабель 7 слугує для з'єднання із операційним підсилювачем[17]. Недоліками є недостатня точність та можливість використання для вимірювання короткочасних процесів [17].

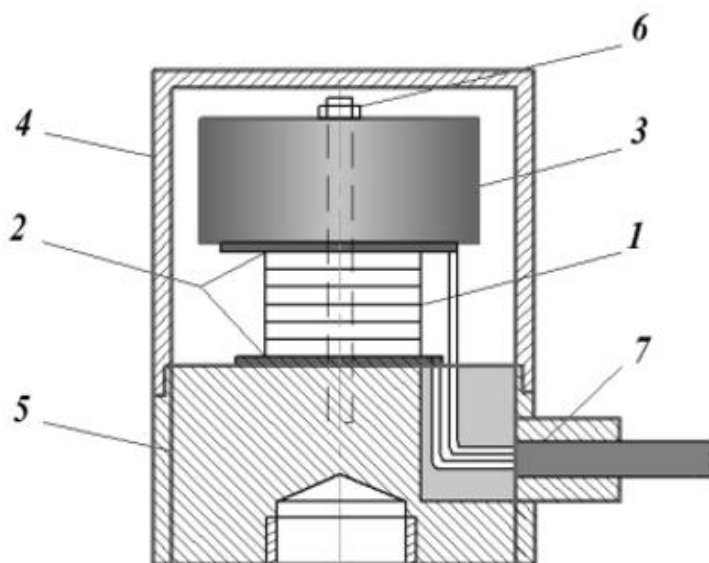


Рис 1.6. Схема п'єзоелектричного гравіметра.[17]

### 1.6.3. Ємнісні гравіметри

Ємнісні гравіметри одні із найперспективніших чутливих елементів для автоматизованої гравіметричної системи. На кафедрі приладобудування НТУУ “КПІ” розроблено та досліджено одноканальний ємнісний гравіметр (ЄГ) зображений на рис.1.7 [18]. Принцип дії заключається у зміні ємності конденсатора, який виконано у вигляді двох металевих пластин, що розділені діелектриком. Нижня обкладинка з’єднана пружною мембраною, до якої прикріплена маса, а верхня з герметичним корпусом. Ці обкладинки, утворюють конденсатор, що має змінний зазор  $\delta$  та ємність  $q$ . Маса під силою тяжіння починає рухатись і згинати мембрану, чим змінює зазор  $\delta$  між верхньою та нижньою обкладинками, а отже, і значення ємності  $q$ , яка обернено пропорційна прискоренню  $g_z$ . Параметри чутливого елемента ємнісного гравіметра підібрані так, що частота його власних коливань дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, яка може бути виміряна на фоні завад. Тобто, чутливий елемент гравіметра виконує також функції фільтра низьких частот [11,18]. До недоліків можна віднести шумний вихідний сигнал, та недостатню точність за рахунок залишкових похибок [18,19,20].

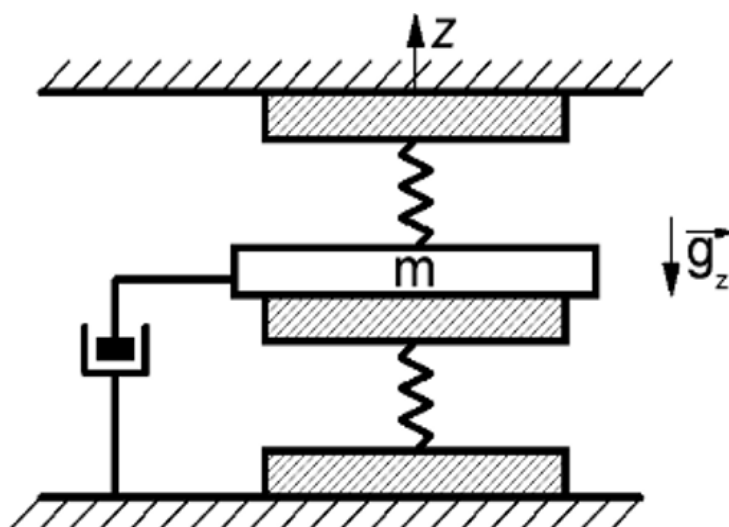


Рис. 1.7. Принципова схема одноканального ЄГ [18]

## 1.7. Висновок до першого розділу

У першому розділі було проведено огляд джерел та матеріалів по безпілотним літальним апаратам. Була наведена порівняльна таблиця трьох різних БПЛА, один з яких цивільний, а два інші військові. Із таблиці 1.1 можна зробити висновок, що цивільні та військові безпілотники зі спільного мають лише дистанційне управління. До основних відмінностей можна навести розміри, тип живлення та час роботи: військові БПЛА в більшості мають двигуни внутрішнього згорання, що забезпечує до 24 годин безперервної роботи без втрати потужності, як це є в електродвигунах, що живляться від батареї. Враховуючи складність управління, кількість екіпажу для військових апаратів може складати до декількох чоловік, а обслуговуючого персоналу до декількох десятків. Вартість цивільних БПЛА суттєво нижча від військових, проте і розміри теж у рази менші. Отже, було розглянуто типи БПЛА по компонованню двигунів та по конструкції. Визначено основні напрямки роботи цивільних та військових БПЛА, а також їх порівняння. Серед гравіметрів було наведено основних представників авіаційної гравіметрії, розглянуто їх переваги та недоліки. Можна зробити висновок, що основними проблемами наявних гравіметрів є: низька точність, нелінійність вихідної характеристики, похибки зв'язані із вертикальним прискоренням, інструментальні похибки, недостатня швидкодія. Визначено, що точність гравіметра повинна бути не менше ніж 0.5 мГал, щоб успішно застосовувати його для проведення гравіметричних досліджень за допомогою БПЛА.

## РОЗДІЛ 2.

### ЄМНІСНИЙ МЕМС ГРАВІМЕТР. ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ ГРАВІМЕТР ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

#### 2.1. Ємнісний гравіметр. Огляд патентної бази.

Досягти високу точність[22] ємнісного гравіметра можна тільки при використанні компенсаційного методу, коли ємнісний перетворювач виконує роботу нуль-органу у системі компенсації гравіметра. При прямому методі динамічний діапазон становить близько 0,2 мГал, що є недостатнім для нормального функціонування і високоточних вимірювань у цілому[21].

Гравіметр рис.2.1 [22] складається із демпфованої кварцової чутливої системи 1, ємнісного перетворювача, що складається із двох пар нерухомих 2 та однієї пари рухомих 3 вертикальних пластин, комутатора 4, котушки індуктивності 5, виконаної на тороїдальному осерді, ВЧ-генератора 6, диференціального перетворювача частота-код 7, регістра 8, суматора 9, перетворювача код-число імпульсів 10, реверсивного лічильника 11, R-S триггера 12 та блока управління 13[11,23].

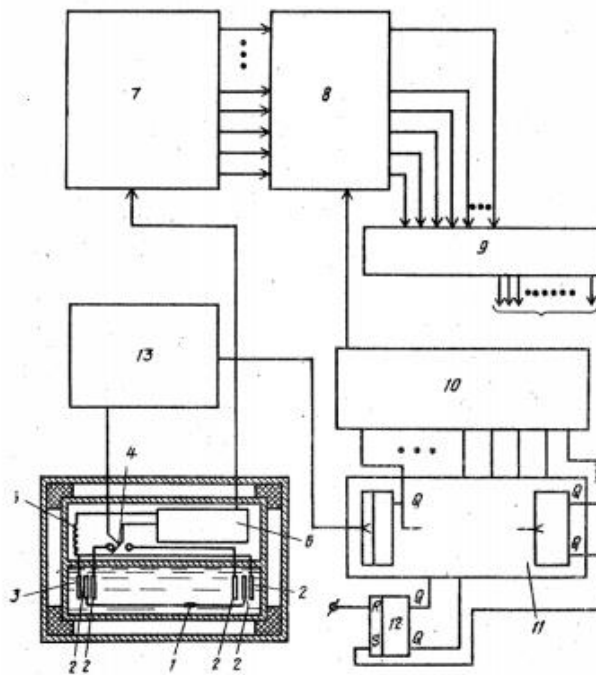


Рис.2.1 Схема ємнісного гравіметра[23]

## 2.2. Ємнісний МЕМС гравіметр

Одним з основних елементів МЕМС є актюатори– вузли, які виконують функцію перетворювача енергії з одного виду на інший (в основному, на механічну). Для створення цих вузлів можуть бути використані різні фізичні явища, і їх загальна кількість невідомо зростає. Часто застосовуються електростатичні, термоелектричні, п'єзоелектричні, осмотичні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні та інші типи актюаторів [24].

Ємнісні перетворювачі часто використовуються для вимірювання прискорень та переміщень різноманітних механічних елементів[5]. У більшості випадків сам перетворювач має вигляд гребневих електродів, що своїми пальцями входять у міжпальцеві проміжки іншого гребеневого електрода. Іншою поширеною конструкцією ємнісного перетворювача є дві пластини, одна з яких рухома, а інша – ні. Рухомою може бути наприклад, мембрана чи пружна балка тощо. Робота ємнісного перетворювача забезпечується зміною відстані між пластинами чи площі перекриття цих поверхонь, що розміщені у безпосередній близькості [21,24,25].

Всі елементи та вузли багатьох МЕМС можна розділити на дві групи: група основних елементів та вузлів, призначених для безпосереднього виконання основної функції, заради якої було створено цей прилад, та інша група – група допоміжних елементів та вузлів, призначених для забезпечення працездатності основної групи.[24] Як приклад, можна навести більшість вище перелічених перетворювачів, які слугують для перетворення переміщень пружних первинних вимірювальних перетворювачів: пружних балок, мембран, пружин, стержнів, струн тощо [26].

Ємнісні МЕМС - акселерометри, вироблені компаніями AnalogDevices, Bosch, Delphi, Denso, Freescale, Kionix, SiliconDesigns, ST Microelectronics, VTI Technologies займають лідируючі позиції на сучасному ринку [11].

Принцип дії ємнісного акселерометра заснований на зміні ємності чутливого елемента з електродами при переміщенні інерційної маси, що є його частиною, під дією ПСТ[5]. У більшості МЕМС - акселерометрів прискорення змінює відстань  $d$  між обкладинками і тим самим, - ємність конденсатора. Сенсор перетворює зміну ємності акселерометра в електричний заряд, напругу або струм, що є вихідним сигналом. Ємнісний сенсорний елемент складається з двох фіксованих електродів. Між ними підвішена рухома обкладинка, навантажена інерційною масою, яка являє собою загальний електрод ємнісного півмоста (рис.2.2. а-в)[24].

Диференціальний режим з'єднання двох конденсаторів  $C1$  і  $C2$  (рис.2.2 в) дозволяє збільшити амплітуду і поліпшити лінійність сигналу [11].

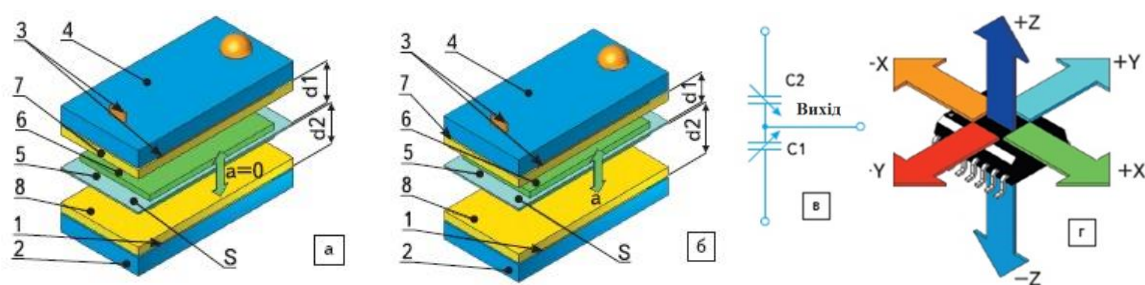


Рис. 2.2. Ілюстрація вимірювального принципу диференціального ємнісного акселерометра [15]:

а, б - фізична модель вимірювальної структури (корпус перетворювача умовно не показаний): 1, 3 - нерухомі металеві обкладки; 2, 4 - зафіксовані друковані плати; 5 - рухома обкладка; б - інерційна маса (метал або діелектрик); 7, 8 - шари діелектрика; S - фіксована площа перекриття обкладинок;  $d1$ ,  $d2$  - змінні відстані між обкладинками; а - акселерометр у стані спокою; б - під дією прискорення а; в - еквівалентна електрична схема; г - розміщення вимірювальних осей і ступенів свободи (півосей) відносно корпусу ІС у корпусі SOIC [7]

Майже всі диференціальні ємнісні акселерометри об'єднують електроніку і обробляють сигнал, використовуючи такі співвідношення:  $C1/C2$

або  $(C1 - C2)/(C1 + C2)$ . Пояснити допоможе формула для ємності плоского конденсатора[36]:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon$ - відносна діелектрична проникність матеріалу;

$\varepsilon_0$  - діелектрична постійна;

$S$  - площа перекриття обкладинок;

$d$  - відстань між обкладинками.

Виходячи із фізичної природи перетворювача, можна навести переваги та недоліки. До переваг належать простота конструкції та можливість розміщувати чутливий елемент у будь якому напрямку, що дозволяє встановлювати прискорення по всіх шести ступенях свободи (рис.2.2г). З розвитком технологій MEMS дана перевага доповнилася можливістю детектувати тривимірні осі[11,15].

## 2.3. Двоканальний ємнісний гравіметр. Математична модель.

### 2.3.1. Конструкція MEMS двоканального ємнісного гравіметра

Як уже зазначалось актуальність мікроелектромеханічної системи на сьогодні беззаперечна. MEMS конструкція ДЄГ складається із двох одноканальних гравіметрів, що встановлені протилежно одне до одного.

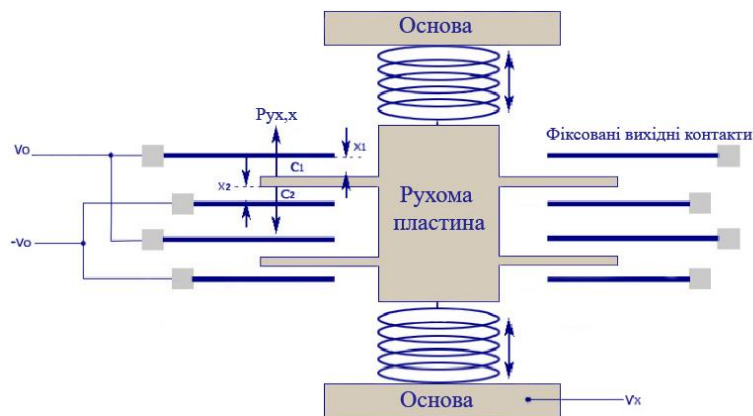


Рис.2.3. Конструкція MEMS ємнісного гравіметра

Електричні вихідні сигнали із двох ідентичних каналів спрямовуються у суматор, тому результуючий вихідний сигнал ДЄГ буде дорівнювати подвоєному прискоренню вільного падіння,  $2g$ . Далі корисний сигнал

потрапляє у підсилювач, та підсилений у аналогово-цифровий перетворювач, де отримає оцифрований вигляд. Цифровий код потрапляє безпосередньо у комп'ютер управління АГС, де за допомогою штучного інтелекту визначається відхилення  $\Delta g$ . Отже, використання двох каналів забезпечує відсутність на виході гравіметра ряду похибок: неідентичності конструкцій, впливу вологості, тиску, змін температури зовнішнього середовища. Одні із важливих характеристик двоканальності є усунення похибки вертикального прискорення БПЛА.

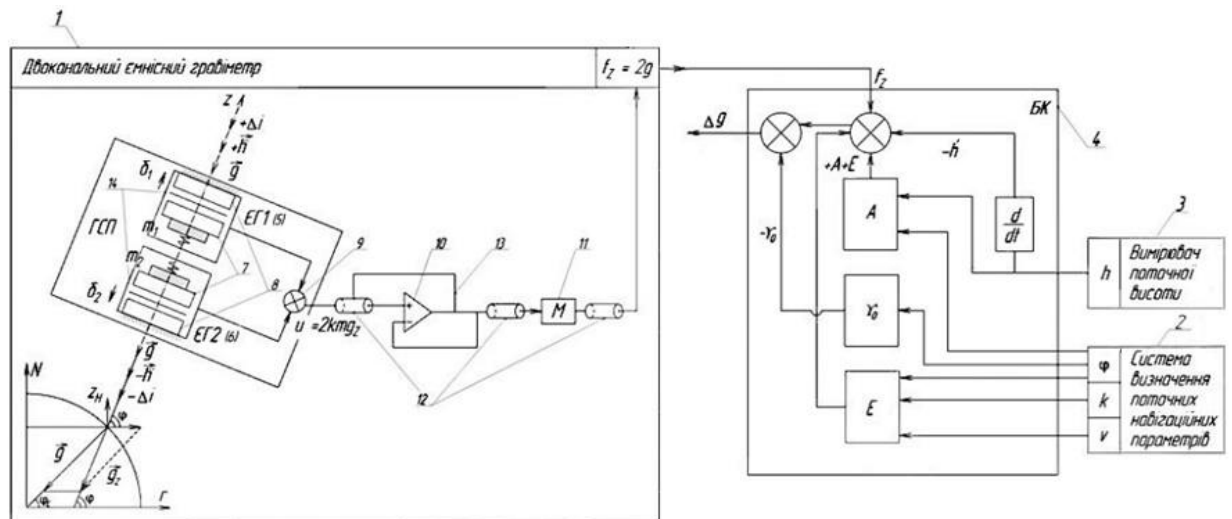


Рис. 2.4. Схема МЕМС двоканального ємнісного гравіметра[11]

- 1 - гравіметр, 2- система визначення поточних навігаційних параметрів,  
 3 -вимірювач поточної висоти, 4 - БК, 5, 6 - ємнісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 відповідно, 7-рухомі і 8 - нерухомі пластини, 9 - суматор, 10 - підсилювач,  
 11 - цифровий модуль, 12 – екрановані коаксіальні кабелі, 13 - захисне кільце,  
 14 – діелектрики

При проектуванні на вісь  $Oz$  (рис. 2.4.) гравіметра всіх впливів(прискорення сила тяжіння  $g_z$ , вертикальне прискорення БПЛА  $\ddot{h}$ , інструментальні похибки  $\Delta i$  які формуються від неідентичності конструкцій та мас ідентичних приладів, впливу зовнішніх збурень середовища) в результаті отримаємо такі залежності[11]:



$$u_1 = k(mg_z + m_i \ddot{h} + \Delta i), \quad (2.2)$$

$$u_2 = k(mg_z - m_i \ddot{h} - \Delta i), \quad (2.3)$$

де  $u_1$  – вихідний електричний сигнал ємнісного елемента ЄГ1 першого каналу;

$u_2$  – вихідний електричний сигнал ємнісного елемента ЄГ2 другого каналу;

$m_i$  – інерційна маса у кожному з каналів;

$k$  – електрична стала.

Вихідні електричні сигнали із обох каналів додаються у суматорі 9:

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (2.4)$$

де  $u_{\Sigma}$  – вихідний сигнал підсилювача 10.

### 2.3.2. Математична модель руху ДЄГ за умов розташування установки на Землі

На рис. 2.5. зображено коливальну систему, що складається із ємнісного гравіметра, де позначено: інерційна маса ( $IM$ ), коефіцієнт пружності  $k$  та демпфуючий елемент ( $ДЕ$ ). Демпфуючим елементом у даному випадку є опір тертя повітря, який створюється внаслідок руху інерційної маси. Елемент жорсткості  $k$  характеризується пружними властивостями ЄГ [11].

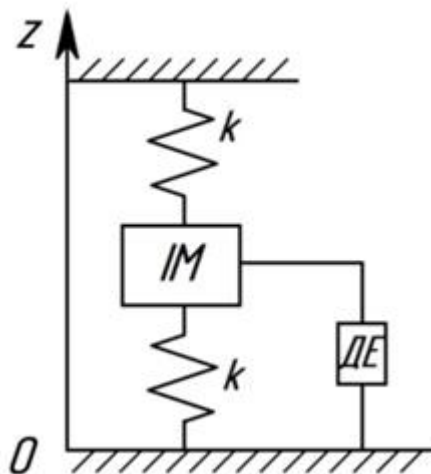


Рис. 2.5. Коливальна система ЄГ

Схема наведена вище актуальна лише за таких умов[21]:

- рух інерційної маси являється прямолінійним та відбувається лише вздовж осі 0-z, яка перпендикулярна до площини встановлення ємнісного ЧЕ;
- опора, інерційна маса, підвіси ЄГ є недемпфованими;
- масу пружного елемента можна прирівняти до нуля у порівнянні з інерційною масою;
- у межах можливих коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента.

ІМ піддається інерційній силі ( $F_i$ ) дії вертикального прискорення під час руху БПЛА, сила пружності ( $F_{np}$ ) та сила опору руху ІМ ( $F_{op}$ )[11]:

$$F_i = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (2.5)$$

$$F_{op} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (2.6)$$

$$F_{np} = -kx, \quad (2.7)$$

де  $n$ – коефіцієнт затухання;

$k$ – коефіцієнт пружності пружних елементів;

$x$ – зміщення інерційної маси ємнісного гравіметра відносно положення рівноваги.

Відповідно до другого закону Ньютона, рух інерційної маси із прискоренням  $g_z$  причиняє сила:

$$G = mg_z, \quad (2.8)$$

де  $G$  – сила, яка діє на інерційну масу;  $m$  – величина інерційної маси.

Кінцеве рівняння руху ємнісного гравіметра із врахуванням (2.5) – (2.8) буде мати вигляд:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + kx = -mg_z. \quad (2.9)$$

Враховуючи, що конструкція інерційна, то двома першими складовими рівняння (2.9) можемо знехтувати.

Отримаємо:

$$kx = -mg_z. \quad (2.10)$$

Отже, рівнянням руху одноканального ЄГ на Землі, буде [20]:

$$g_z = -\frac{k}{m}x.$$

Вихідна напруга одноканального ємнісного чутливого елемента  $u_1$  буде пропорційна зміщенню інерційної маси  $x$ . Вихідна напруга одноканального ємнісного гравіметра буде [11]:

$$u_1 = k(mg_z).$$

Для двоканального ємнісного гравіметра на ємнісні елементи діє прискорення  $g_z$ . Для двоканального гравіметра вихідні сигнали будуть [11]:

$$u_1 = k(mg_z); \quad (2.11)$$

$$u_2 = k(mg_z), \quad (2.12)$$

де  $u_1$  – вихідний сигнал ємнісного чутливого елемента одного каналу,  
 $u_2$  – вихідний сигнал ємнісного чутливого елемента другого каналу,  
 $m_i$  – інерційна маса у кожному каналі.

Вихідні напруги  $u_1$  та  $u_2$  ємнісних елементів двох каналів додаються у суматорі. Отже, додавши (2.11) та (2.12) отримаємо:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (2.13)$$

де  $u_\Sigma$  – вихідний сигнал підсилювача.

Тобто, з врахуванням (2.13) для двоканального ємнісного гравіметра рівняння руху в умовах установки на Землі, буде [11]:

$$kx = -2mg_z \quad (2.14)$$

### 2.3.3. Рівняння руху ДЄГ в за умови рухомої основи.

У роботі [27], було отримано рівняння руху системи з одним гравіметром:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi + 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi - 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cos^2 \varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (2.15)$$

де  $f_z$  – вихідний сигнал ДЄГ;  $g_z$  – ПСТ вздовж чутливої осі ДЄГ;  $v$  – швидкість БПЛА;  $r$  – радіус місцезнаходження БПЛА;  $e$  – стиск еліпсоїда;  $\varphi$  – географічна широта;  $k$  – курс БПЛА;  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі;  $h$  – висота БПЛА над еліпсоїдом;  $\dot{h}$  – вертикальна швидкість;  $\ddot{h}$  – вертикальне прискорення;  $\gamma_0$  – довідкове ПСТ.

З усіх членів рівняння (2.15) всі крім  $g_z$  перешкоди. Перепишемо рівняння (2.15) для прискорення вільного падіння:

$$g_z = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} + \Delta_3 \quad (2.15)$$

Аномалія прискорення сили тяжіння дорівнює дельті вздовж осі чутливості ДЄГ. Тому рівняння руху автоматизованої системи для визначення аномалії  $\Delta g$ , набуває вигляду:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (2.16)$$

Двоканальний ємнісний гравіметр у складі автоматизованої системи є і фільтром основного збурення і чутливим елементом. Тому рівняння руху автоматизованої системи із ДЄГ для визначення  $\Delta g$  буде мати вигляд [21]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (2.17)$$

Оскільки в автоматизовані гравіметричні системі використано ДЄГ, що прибирає вплив вертикального прискорення, то прискорення  $\ddot{h}$  відсутнє у рівнянні (2.17). Вплив вертикального прискорення більший від корисного сигналу прискорення сили тяжіння у  $10^3$ разів.

Рівняння (2.17), переписемо у більш простому вигляді [21]:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (2.18)$$

де  $f_z$  – вихідний сигнал ДЄГ;

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi - \text{ поправка Етвеша;}$$

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{ поправка висоти;}$$

$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$  – довідкове значення прискорення сили тяжіння прийняте на Генеральній Асамблеї Міжнародного Союзу у міжнародній гравіметричній системі IGSN71[11];

$\gamma_{0e} = 9,780318 \text{ м/с}^2$  – екваторіальне значення прискорення сили тяжіння;

$\Delta_3 = K_{EG} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right)$  – похибка від впливу кутової швидкості обертання Землі, де  $\lambda$  – довгота;  $\varphi$  – широта;  $\bar{\varphi}$  – середнє значення широти[11,12,14]

Розглянувши рівняння (2.18) можна зробити висновок, що автоматизована гравіметрична система складається із підсистем що виконують свої функції: гравіметр вимірює прискорення сили тяжіння, стабілізована платформа стабілізує вісь чутливості ДЄГ у вертикальне положення, навігаційна система визначає координати об'єкта та його швидкості, бортовий комп'ютер здійснює обчислювальні операції із перетворення сигналів, а також містить в собі базу знань з прикладами різних аномалій прискорення сили тяжіння. Отже, формулу (2.18) можна представити наступною функціональною схемою (рис.2.6.)

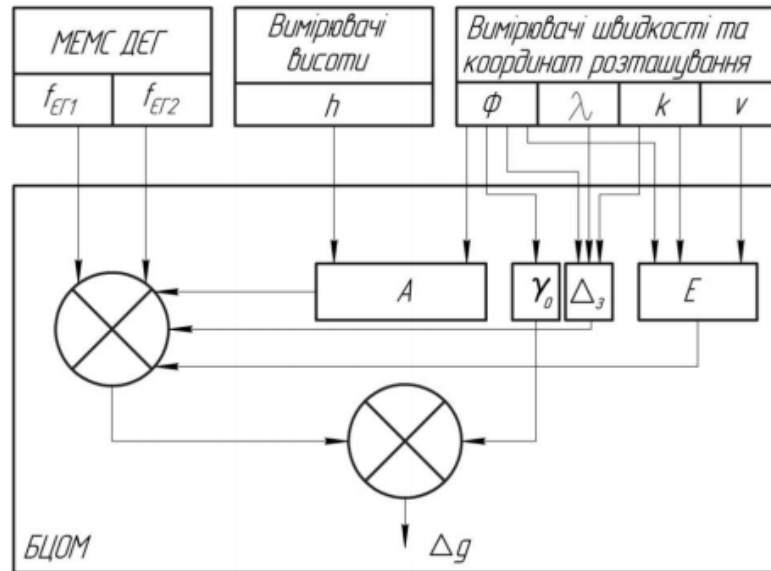


Рис.2.6. Функціональна схема автоматизованої гравіметричної системи із ДЄГ в якості чутливого елемента[7]

З урахуванням (2.14) та (2.18) рівняння руху автоматизованої системи за умови встановлення ДЄГ на БПЛА буде мати вигляд [11]:

$$\begin{aligned}
 kx = & 2g_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[ 1 - 2\cos^2\varphi * \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \\
 & * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \\
 & - \gamma_{0e} (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi) + \\
 & + K_{EG} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right)
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Отже, можна зробити висновок, що перевагою двоканального ємнісного гравіметра є відсутність впливу вертикального прискорення літального апарату, яке є набагато більшим за корисний сигнал.

### 2.3.4. Рівняння руху двоканального ємнісного гравіметра для моделювання на комп'ютері

Використавши перетворення Лапласа для формули (2.9) отримаємо:

$$mp^2x(p) + px(p) + kx(p) = -2mg_z(p), \tag{2.20}$$

де  $x(p)$  – зображення зміщення інерційної маси;  $g_z(p)$  – зображення прискорення сили тяжіння вздовж чутливої осі гравіметра.

Передатна функція двоканального ємнісного гравіметра по каналу прискорення сили тяжіння для напруги:

$$W(p) = \frac{x(p)}{g_z(p)} = \frac{-2m}{mp^2+np+k} \quad (2.21)$$

Оскільки напруга на виході із двоканального ємнісного гравіметра пропорційна зміщенню інерційної маси чутливого елемента, то із (2.21) виведемо передатну функцію для вихідної напруги:

$$W_{\text{ЕГ}}(p) = \frac{K_{\text{ЕГ}}}{T_1p^2+T_2p+1},$$

де  $K_{\text{ЕГ}}$  – статичний коефіцієнт передачі двоканального ємнісного гравіметра;  $T_1$  та  $T_2$  – коефіцієнти сталої часу для другого порядку.

Поділивши (2.20) на  $m$ , отримаємо [11,28]:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -2g_z, \quad (2.22)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт демпфування;  $\omega_0$  – власна частота двоканального ємнісного гравіметра.

Конструкція гравіметра піддається впливу залишкових інструментальних похибок, які викликані змінами середовища, наприклад, зміна тиску чи температури. Похибка вертикального прискорення може спричинити нелінійність вихідної характеристики. Тому необхідно переписати рівняння (2.22) у вигляді [11]:

$$m\ddot{x} + \dot{x}[2n - L\sin(\omega t + \varepsilon)] + \omega_0^2x = N\sin\omega t, \quad (2.23)$$

де  $L = m\omega_a$ ,  $N = m\omega_b$  – параметри вібрації,  $\omega_a$  та  $\omega_b$  – амплітуди вібраційних прискорень.

Запишемо, що  $M(t) = 2n - L\sin(\omega t + \varepsilon)$ , а  $D(t) = \omega_0^2$ , тоді:

$$\ddot{x} + \dot{x}M(t) + D(t)x = 0, \quad (2.24)$$

де  $M(t)$  та  $D(t)$  – Т-періодичні функції [11].

Рівняння (2.24) можна привести до ідентичного, де  $M(t) = const$ .

Нехай:

$$\int_0^t M(t_1) dt_1 = \psi t + M_1(t), \quad (2.25)$$

де  $\psi = 2n$ ;  $M(t_1) = \int_0^t (M(t_1) - \psi) dt = \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon)$ .

Змінюючи:

$$x = e^{-\frac{1}{2}M(t_1)} x' = e^{-\frac{1L}{2\omega} \cos(\omega t + \varepsilon)} x', \quad (2.26)$$

отримаємо:

$$\ddot{x}' + 2n\dot{x}' + F(t)x' = 0, \quad (2.27)$$

у якому:

$$F(t) = \omega_0^2 + \nu_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8), \quad (2.28)$$

де  $\sigma_8 = \arctg \frac{\omega}{2\pi}$ ;  $\nu_0 = \frac{L\sqrt{\omega+4\pi^2}}{2}$ .

Запишемо формулу (2.28) з урахуванням (2.22) та (2.27) [11]:

$$\ddot{x}' + 2n\dot{x}' + \omega_0^2 + \nu_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8)x' = N \sin \omega t, \quad (2.29)$$

а з врахуванням параметрів:  $m=0,005\text{кг}$ ,  $e + \sigma_8 = 0$  [11]:

$$\ddot{x}' + 2\xi\omega_0\dot{x}' + (\omega_0^2 + \nu_1 w_b \sin \omega t)x' = 0,005 w_a \sin \omega t, \quad (2.30)$$

де  $\nu_1 = \frac{\nu_0}{w_b}$ .

Отже у підпункті було отримано рівняння (2.30) типу Мат'є-Хілла, що є зручним для моделювання за допомогою комп'ютера [11].



### 2.3.5. Структурна схема двоканального ємнісного гравіметра

Двоканальний ємнісний гравіметр, як і всі інші засоби вимірювальної техніки є перетворювачами вхідної величини на вихідну. Отже відповідно до розглянутої математичної моделі, можна побудувати структурну схему двоканального ємнісного гравіметра. Створення структурної схеми необхідне для визначення передаточного коефіцієнту гравіметра  $K_{\text{ЄГ}}$ .

На рис.2.7. зображено структурну схему одноканального ємнісного гравіметра [11].

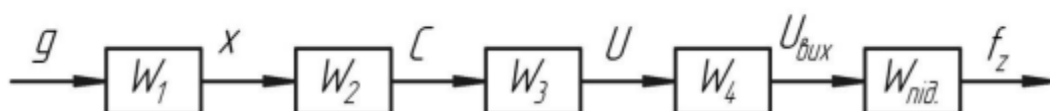


Рис. 2.7. Структурна схема ЄГ [11]

$W_1$  –перетворення прискорення сили тяжіння, що діє на інертну масу ємнісного елемент. Ланка  $W_1$  пропорційна до сили Земного тяжіння  $G$ , що діє на ємнісний елемент (ЄЕ). При спрямуванні сила тяжіння перпендикулярно до площини рухомої площадки, відстань буде змінюватись рівномірно, отже  $G = 2F_{\text{пр}} = 2kx$ , тоді [21]:

$$W_1 = \frac{x}{G} = \frac{G}{2k} * \frac{1}{G} = \frac{1}{2k}; \quad (2.31)$$

$W_2$  – зміна відстані між обкладинками перетворюється на зміну ємності  $C$  на електродах;  $W_3$  –зміна ємності перетворюється у зміну напруги на електродах чутливого елементу;  $W_4$  – описує процес, який проходить при зміні напруги на ємнісному елементі;  $W_{\text{під}}$  – передатна хаактеристика операційного підсилювача напруги. [21]

На рис. 2.8. зображено структурну схему двоканального ємнісного гравіметра [11].

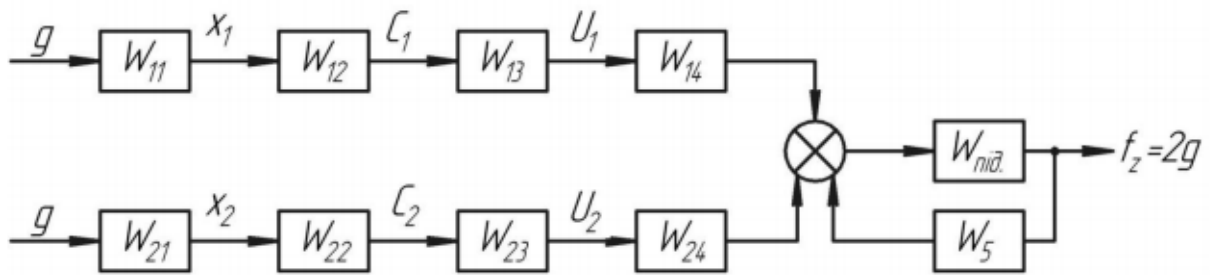


Рис. 2.8. Структурна схема двоканального ємнісного гравіметра [11]

$W_{11}, W_{21}$  –перетворення прискорення сили тяжіння, що діє на інертну масу ємнісного елемент;  $W_{12}, W_{22}$  – зміна відстані між обкладинками, яка перетворюється на зміну ємності  $C$  на електродах;  $W_{13}, W_{23}$  –зміна ємності, що перетворюється у зміну напруги на електродах чутливого елементу;  $W_{14}, W_{24}$  – описує процес, який проходить при зміні напруги на ємнісному елементі;  $W_{\text{під}}$  – передатна характеристика операційного підсилювача напруги;  $W_5$  – фільтрування за допомогою зворотнього зв’язку.[21]

Перетворення зміни відстані  $\Delta d$  між обкладинками на зміну ємності  $\Delta C$  відповідає ланці  $W_2$ :

$$W_2 = \frac{\Delta C}{x} = \frac{\varepsilon * \varepsilon_0 * S * x}{d * x} = \frac{\varepsilon * \varepsilon_0 * S}{d} \quad (2.32)$$

де  $d$  – відстань між обкладинками у стані спокою;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність матеріалу;  $\varepsilon_0$  – діелектрична постійна вакууму;  $S$  – площа обкладинок конденсатора[11, 21].

Перетворення зміни ємності  $\Delta C$  у зміну напруги  $\Delta U_{\text{ey}}$  на електродах чутливого елементу відповідає ланці  $W_3$  [21]:

$$W_3 = \frac{\Delta U_{\text{ey}}}{\Delta C} = \frac{U_{\text{вх}} * \Delta C}{C * \Delta C} = \frac{U_{\text{вх}}}{C} \quad (2.33)$$

Процес, що проходить при зміні напруги на ємнісному елементі, тобто передача  $\Delta U_{\text{сy}}$  в коло  $U_{\text{вх}}$  відповідає ланці  $W_4$ .  $W_4$  – передатна функція диференціюючої ланки.  $R_{\text{вх}}$  – вхідний опір, який має підсилювач напруги. Передатна функція  $W_4$  має вигляд[21]:

$$W_4 = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{сe}}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}, \quad (2.34)$$

де коефіцієнт  $\varepsilon_R = \frac{R_{\text{сe}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}$ , а постійна часу  $\tau = R_{\text{сe}} * C_{\text{сe}}$ .

Передатна характеристика операційного підсилювача напруги відповідає ланці  $W_{\text{під}}$ , яка виявляє властивості інерціальної ланки першого порядку[21]:

$$W_{\text{під}} = \frac{K_{\text{оп}}}{1 + p\tau_{\text{оп}}}, \quad (2.35)$$

де  $K_{\text{оп}}$  – коефіцієнт підсилення, який має операційний підсилювач,  $\tau_{\text{оп}}$  – постійна часу.

Але, оскільки ємнісний гравіметр працює у вузькому діапазоні частот, то передатна характеристика може бути приблизно рівною коефіцієнту підсилення ОП, тому вважатимемо[21]:

$$W_5 = K_{\text{оп}}. \quad (2.36)$$

Тоді загальне передатне відношення буде мати вигляд[11]:

$$W = (W_{11} * W_{12} * W_{13} * W_{14} + W_{21} * W_{22} * W_{23} * W_{24}) \frac{W_{\text{під}}}{1 + W_{\text{під}} * W_5}. \quad (2.37)$$

#### 2.4. Розрахунок фізичних параметрів МЕМС гравіметра

Конструкція Ємнісного МЕМС гравіметра наводилась у попередніх пунктах розділу, а зараз визначимо основні параметри МЕМС гравіметрів[21]:

- Власна частота коливань  $f$ :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.38)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружності підвісу,  $m$  – маса. Абсолютний і відносний коефіцієнти демпфування розраховуються за формулами[21, 29]:

$$b = n\mu \frac{h^3 l}{d^3}, \quad (2.39)$$

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}, \quad (2.40)$$

де  $n$  – кількість пар зубів зустрічно-штирьового конденсатора,  $\mu$  – в'язкість повітря,  $h$  – висота зуба,  $l$  – довжина зуба,  $d$  – відстань між пластинами[25].

Розрахункове значення величини напруги притягання, або напруги, при якій рухома обкладка починає притягатись до нерухомої розраховується за формулою[21, 29]:

$$U_0 = \sqrt{\frac{8d^3 k}{27\varepsilon_0 S}}, \quad (2.41)$$

де  $S$  – площа обкладки,  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму[21, 29].

## 2.5. Висновки до другого розділу

У другому розділі було розглянуто ємнісний МЕМС гравіметр, а саме його виконання у двоканальному режимі, тобто двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр. Було розглянуто математичну модель як одного каналу, так і двох протилежно напрямлених каналів одночасно. Сформовано рівняння руху для двоканального ємнісного гравіметра як в умовах стаціонарної, так і рухомої установки (тобто з використанням безпілотного літального апарата). Виведено рівняння руху двоканального ємнісного гравіметра для моделювання за допомогою комп'ютерної техніки. Створено структурну схему а також визначено передаточне відношення як для кожної ланки окремо, так і для одного та двох каналів гравіметра сумарно. Досліджено основні характеристики ємнісного МЕМС гравіметра, а саме: власну частоту коливань, власний та відносний коефіцієнти демпфування, значення напруги притягання для конденсатора. Визначено формули розрахунку основних параметрів.

## РОЗДІЛ 3.

### ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО ГРАВІМЕТРА

#### 3.1. Дослідження стійкості двоканального ємнісного гравіметра.

Через інерційність системи при роботі виникають динамічні похибки та перехідні процеси. В результаті перехідних процесів, вихідний сигнал значно спотворюється у часі та формі, що представляє відповідні неточності. Стійкість системи – це здатність системи при реальному збуренні не допустити безкінечного відхилення у вихідному значенні. Систему можна вважати лінійною, оскільки нелінійність є невеликою.

У п. 2.3.5 було виведено рівняння (2.37), що відповідає загальному передаточному відношенню системи. Поділимо (2.37) на  $m$  та введемо нові

змінні:  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,  $2\xi\omega_0 = \frac{n}{m}$ . Тоді рівняння (2.37) буде мати вигляд:

$$W_{\text{ДЕГ}}(p) = \frac{K_{\text{ДЕГ}}}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (3.1)$$

$$W_{\text{ДЕГ}}(p) = \frac{K_{\text{ДЕГ}}}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2} = \frac{K_{\text{ДЕГ}}}{p^2 + 2*0,1*\xi p + 0,1^2} \quad (3.2)$$

де  $\omega_0 = 0,1$  рад/с – власна частота гравіметра, а  $\xi = 0,705$  – коефіцієнт демпфування,  $K_{\text{ДЕГ}} = 0,4$  [11].

Отже, було отримано рівняння:

$$W_{\text{ДЕГ}}(p) = \frac{0,4}{p^2 + 2*0,1*0,705*p + 0,1^2} \quad (3.3)$$

Передатна функція перетворення прискорення сили тяжіння у напругу буде мати вигляд:

$$W_{\text{ДЕГ}}(p) = \frac{0,4}{0,01(100p^2 + 14p + 1)} = \frac{40}{100p^2 + 14p + 1} \quad (3.4)$$

### 3.1.1. Дослідження стійкості системи за критерієм Найквіста

Передаточна функція (3.4) буде використана для дослідження стійкості за критерієм Найквіста.

Щоб отримати частотну функцію, необхідно замінити  $p = j\omega$ :

$$W_{\text{дег}}(p) = \frac{40}{-100\omega^2 + 14j\omega + 1} = \frac{40 * (-100\omega^2 - 14j\omega + 1)}{(1 - 100\omega^2)^2 - (14j\omega)^2} =$$
$$\frac{40 * (1 - 100\omega^2) - j * 40 * 14\omega}{(1 - 100\omega^2)^2 + (14\omega)^2} = X(\omega) + jY(\omega), \quad (3.5)$$

де  $X(\omega)$  – дійсна частина частотної функції;  $Y(\omega)$  – уявна частина.

Виділивши із рівності (3.5) дійсну та уявну частини, отримаємо:

$$\begin{cases} X(\omega) = \frac{40 * (1 - 100\omega^2)}{(1 - 100\omega^2)^2 + (14\omega)^2}; \\ Y(\omega) = \frac{40 * 14\omega}{(1 - 100\omega^2)^2 + (14\omega)^2}; \end{cases}$$
$$X(0) = 40 \quad (3.6 - 3.8)$$

На основі рівнянь (3.6 – 3.8) можна побудувати діаграму Найквіста (рис.3.1)

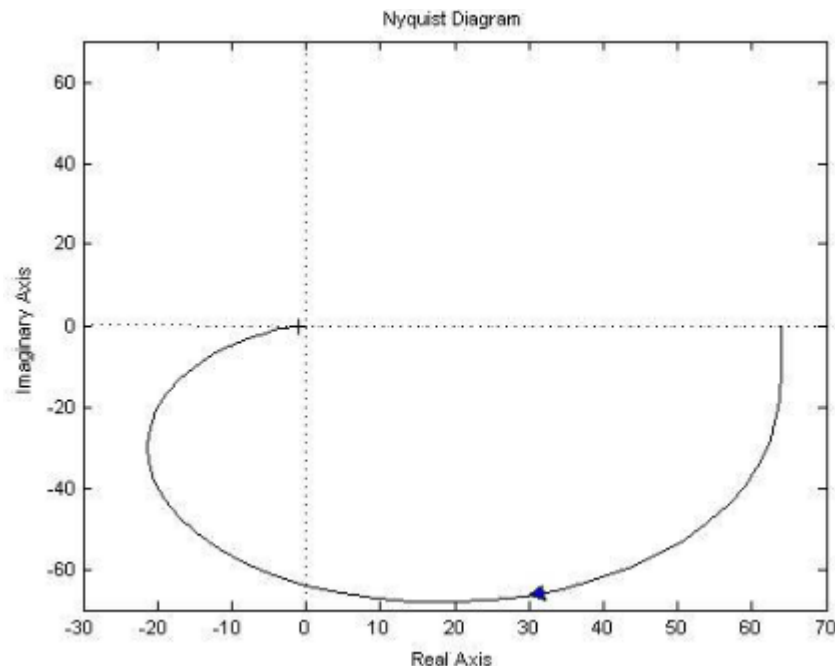


Рис.3.1 Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) гравіметра

За критерієм Найквіста (рис.3.1) можна зробити висновок, що система стійка, оскільки годограф не включає точку із координатами  $(-1;0)$

### 3.1.2. Дослідження стійкості системи за критерієм Гурвіца

Відповідно до критерію Гурвіца, необхідно визначити одразу головний визначник Гурвіца  $D(p)$  (3.9).

$$D(p) = T^2 p^2 + 2\xi T p + (1 + K_{ДЕГ}) = 100p^2 + 14p + (40 + 1) \quad (3.9)$$

За умови, що всі визначники Гурвіца мали знаки однакові до старшого коефіцієнту характеристичного рівняння  $a_n$ , тобто при  $a_{n-1} > 0$  були додатними система буде стійкою[30].

Тобто, необхідною і достатньою умовою стійкості системи другого порядку є додатність коефіцієнтів характеристичного рівняння [11,30]. Досліджувана система відповідає даним умовам:

$$\begin{aligned} a_0 &= T^2 = 100 > 0 \\ a_1 &= 2 * \xi * T = 14 > 0 \\ a_2 &= 1 + K = 40 > 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Із рівнянь 3.10, можна зробити висновок, що система за критерієм Гурвіца являється стійкою.

### 3.2. Опис експериментальної установки

Для проведення есперименту, було створено експериментальну установку, принципова схема зображена на рис 3.2. До складу установки входять: генератор механічних коливань (вібростенд) із вбудованими двома індукційними перетворювачами в механічний електричного сигналу; ДЄГ, розташований на вібростенді; мікросистема збору даних; блок підсилювача вихідного сигналу; генератор змінної напруги; комп'ютер[31,32].

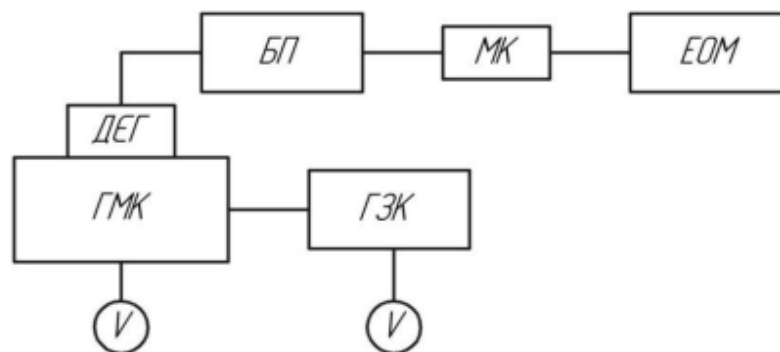


Рис.3.2. Принципова схема експериментальної установки ДЄГ[11,31,32]

де, ГМК – генератором механічних коливань; ДЄГ – двоканальний ємнісний гравіметр; БП – блок підсилення; МК – мікросистема збирання даних; ГЗК – генератор змінної напруги живлення; М – вольтметр для реєстрації напруги[11,21,31].

### 3.2.1. Досліджуваний ДЄГ

В якості чутливого елемента у двоканальному ємнісному MEMS гравіметрі використано два ідентичних ємнісних MEMS акселерометри MMA8452Q[21].

### 3.2.2. Градувальна характеристика ДЄГ

Операція, за якої засіб вимірювання або вимірювальний прилад забезпечуються градувальною шкалою або таблицею називається градуванням[15,21]. Для градування було використано установку(рис.3.3.)

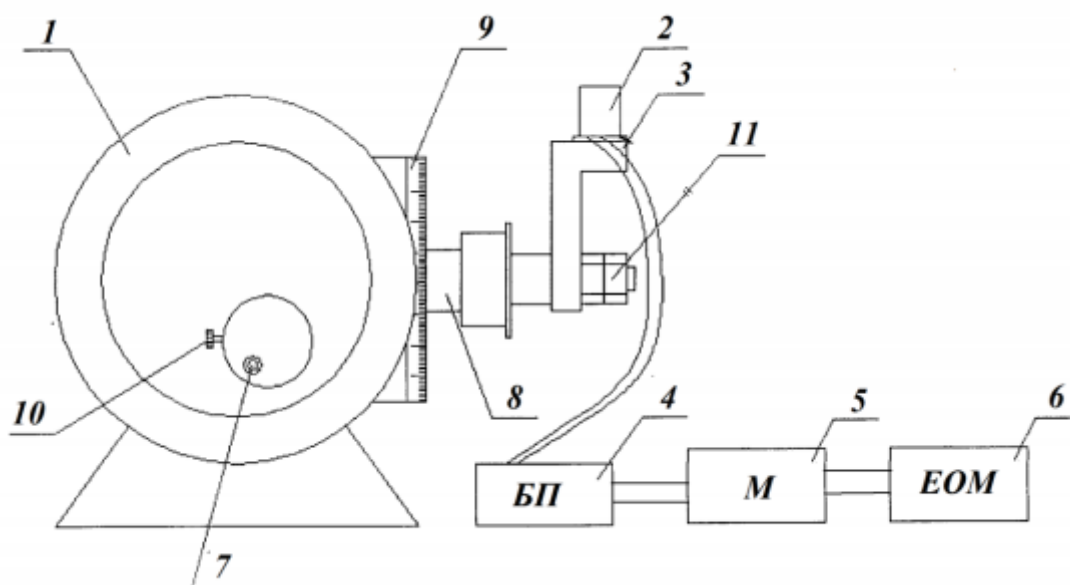


Рис.3.3. Експериментальна установка для градування ДЄГ[11,21]:

- 1 – оптична діляльна головка; 2 – ДЄГ; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення;
- 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал;
- 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки [11,21,32].

Градування відбувається за допомогою нахилення вимірювальної осі гравіметра на деякий відповідний кут за допомогою оптичної ділянкової головки[21,32].



**Градувальна таблиця двоканального ємнісного гравіметра**

№	$\alpha_z$ , град	$g_{z\text{ЕКСП}}$ , мГал	$g_{z\text{ТЕОР}}$ , мГал	Відхилення експериментального від теоретичного по модулю, мГал
1	2	3	4	5
1	0	981118,539	981118,540	0,001
2	10	966213,122	966213,144	0,022
3	20	921949,734	921949,854	0,12
4	30	849673,802	849673,579	0,223
5	40	751580,807	751580,404	0,403
6	50	630651,338	630650,838	0,5
7	60	490558,552	490559,269	0,717
8	70	335563,193	335562,303	0,89
9	80	17366,047	17365,142	0,905
10	90	0	0	0,001

В результаті порівняння отриманих результатів з аналітичним розрахунком, можна побудувати графік залежності вихідного сигналу  $g_z$  від кута повороту  $\alpha_z$  (рис 3.4) [21].

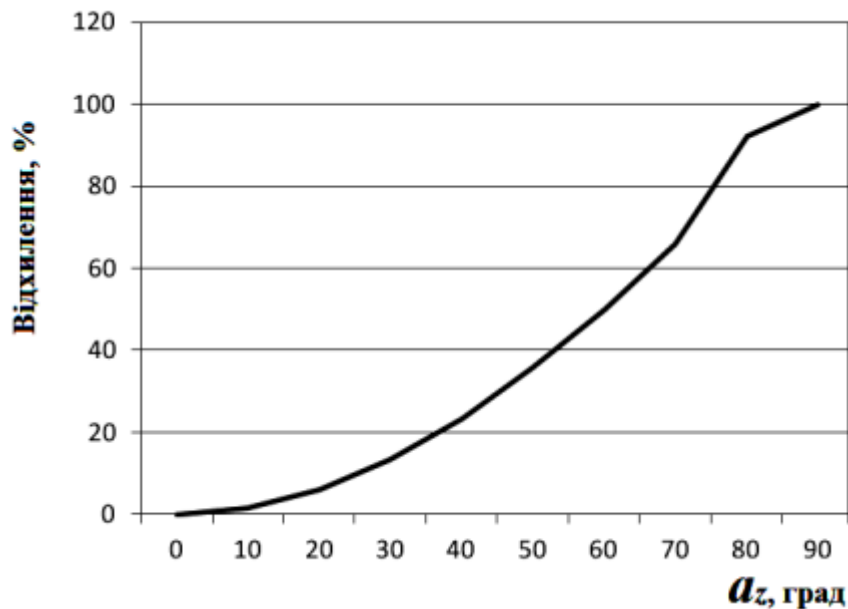


Рис.3.4. Графік залежності відхилення вимірювальної осі від поточного значення прискорення сили тяжіння[11]

Із таблиці 3.1 можна зробити висновок, що різниця між теоретичними та експериментальними значеннями не перебільшує 0,5 мГал. , а кут нахилу вимірювальної осі прямо пропорційно впливає на вихідні характеристики ДЄГ та його неточність. Отже, забезпечення точного співпадіння вимірювальної осі двоканального ємнісного гравіметра із довідковою вертикаллю є основною задачею.

### 3.2.3.Визначення базових параметрів роботи макету моделі

Установка розташована на території КПІ ім. Ігоря Сікорського, GPS координати якого: широта:  $50.449052^{\circ}$  , довгота:  $30.461085^{\circ}$  .

Згідно з [33], за цими координатами:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e}(1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi),$$

Знайдемо довідкове значення прискорення вільного падіння  $\gamma_{КПІ}$  :

$$\begin{aligned} \gamma_{КПІ} = 9.78049(1 + 0.0052884 \sin^2(50.449052) - \\ - 0.0000059 \sin^2(2 \cdot 50.449052)) = 9.81118539 \text{ м/с}^2. \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.2.4. Проведення експерименту

Дані оброблюються та фіксуються на комп'ютері, та оновлюються автоматично, вибірка кожні 10с.

Для кожного випадку розраховано систематичну похибку  $\Delta_g$ :

$$\Delta_g = \left| \overline{g_{експ}(t)} - \gamma_{КПІ} \right|, \quad (3.12)$$

де,  $\overline{g_{експ}(t)}$  – середнє значення вихідного сигналу двоканального ємнісного гравіметра, яке отримане у ході експерименту за період спостереження у 10 с:

$$\overline{g_{експ}(t)} = \frac{1}{N_{експ}+1} \sum_{i=0}^{N_{експ}} \overline{g(t_i)}, \quad (3.13)$$

де,  $N_{експ}$  – кількість отриманих значень за 50 с;  $g(t_i)$  –  $i$ -те значення вихідного сигналу гравіметра.

Абсолютну похибку експериментальних вимірювань  $\Delta_{g_{експ}}$  можна знайти за формулою[21]:

$$\Delta_{g_{експ}} = \frac{\sigma_{\overline{g_{експ}}}}{\sqrt{N_{експ}}} t_p$$
$$\sigma_{\overline{g_{експ}}} = \sqrt{\frac{1}{N_{експ}} \sum_{i=0}^{N_{експ}} \left[ \overline{g(t_i)} - \overline{g_{експ}} \right]^2} \quad (3.14)$$
$$t_p = qt(p, d)$$

де,  $\sigma_{\overline{g_{експ}}}$  – середньоквадратичне відхилення  $\overline{g_{експ}(t)}$ ;  $t_p = qt(p, d)$  – коефіцієнт оберненого розподілу Стюдента за довірчою імовірністю  $p$  та числом ступенів свободи  $d = N_{експ}$ . [21]

**Похибки двоканального ємнісного гравіметра, зумовлені вібраціями[21]**

$\omega$ , рад/с	$\overline{g_{експ}(t)}$ , мГал	$\Delta_{g_{експ}}$ , мГал	$\Delta_g$ , мГал
0	981118,5401	0.001146	0.00006005
0.5	981121,4586	0.006187	2.91861146
1.0	981121,5938	0.048073	3.05382631
5.0	981123,9361	0.581024	5.39613122
10.0	981127,1002	0.850995	8.89864624
30.0	981131,6111	2.764097	13.0710667

Із таблиці 3.2. було знайдено, що вихідний сигнал двоканального ємнісного гравіметра при нульових налаштуваннях установки вібростенду становить  $\Delta_g = 0.00006$  мГал та співпадає із наведеним довідковим значенням ПСТ; для поступальних вібрацій до 10 рад/с, гравіметр має точність у  $\Delta_{g_{експ}} = 0,5$  мГал.[21]

Відповідно з [15,33] та результатами моделювання, резонансний режим виникає на частотах:  $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$  рад/с. Результати розрахунку похибок ДЄГ, зумовлені резонансними режимами роботи ДЄГ наведені у табл. 6.3. Навіть при резонансних режимах точність забезпечується на рівні  $\Delta_{g_{експ}} = 0,5$  мГал.[11,21]

**Похибки ДЄГ, зумовлені резонансними режимами роботи**

$\omega$ , рад/с	$\overline{g_{експ}(t)}$ , мГал	$\Delta_{g_{експ}}$ , мГал	$\Delta_g$ , мГал
0	981118,5401	0.001146	0.000060
0.033	981118,6686	0.198113	0.126386
0.05	981118,7438	0.369125	0.204863
0.1	981119,3439	0.542486	0.485573

Таблиця 3.3. Продовження

0.2	981119,7601	0.412643	0.320256
0.3	981120,6526	0.3753374	0.210509

### 3.2.5. Результати дослідження МЕМС ДЄГ

Із даних, що були наведені в табл.3.3, можна сказати, що теоретичні дослідження співпадають із експериментальними (рис.3.5). Незначна відмінність у показах пояснюється неідеальністю обладнання що використовувалось для випробувань. Із графіків видно, що найгіршою частотою є 0,1 рад/с, оскільки в цій точці похибка набуває своїх максимальних значень, але все ж вона не перевищує точність, що знаходиться в межах 0,5 мГал.

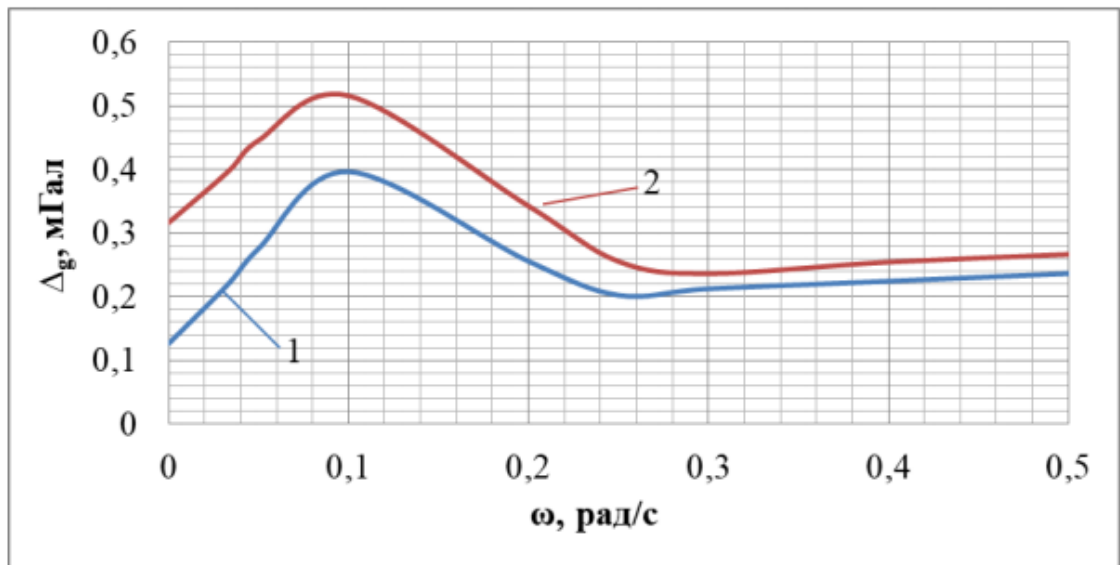


Рис.3.5. Результати експерименту та цифрового моделювання: 1 – цифрове моделювання; 2 – експеримент.

### 3.2.6. Метрологічні характеристики гравіметра

Двоканальний ємнісний гравіметр може працювати не тільки на літальному апараті, а як наземний гравіметр. Точність гравіметра за відсутності механічних вібрації може теоретично складати 0,00006 мГал.

Отже, можна записати статичну характеристику двоканального ємнісного гравіметра, при застосуванні на землі:

$$\bar{g}_{ДЕГ} = \bar{g}_{експ} \pm 6 * 10^{-5} \text{ мГал} \quad (3.15)$$

За наявності збурень, двоканальний ємнісний гравіметр може працювати як гравіметр автоматизованої гравіметричної системи, що знаходиться на борту БПЛА, та матиме точність:

$$\bar{g}_{ДЕГАГС} = \bar{g}_{експ} \pm 0,5 \text{ мГал} \quad (3.16)$$

Відносна похибка ДЄГ НК:

$$\delta_g = \frac{\Delta_g}{\bar{g}_{експ}} * 100\% = \frac{0,5}{981100,37556} * 100\% = 5,09 * 10^{-5}\% \quad (3.17)$$

### 3.2.7. Дослідження параметрів ЧЕ за допомогою вібростенда

Дослідження виконується на стендові, що складається з: генератора механічних коливань 1, підсилювача 3 змінного струму, трьох вольтметрів 4, осцилографа 5, генератора змінної напруги 6. ДЄГ 2 розташований безпосередньо на стенді (рис. 3.6) [21,32,34].

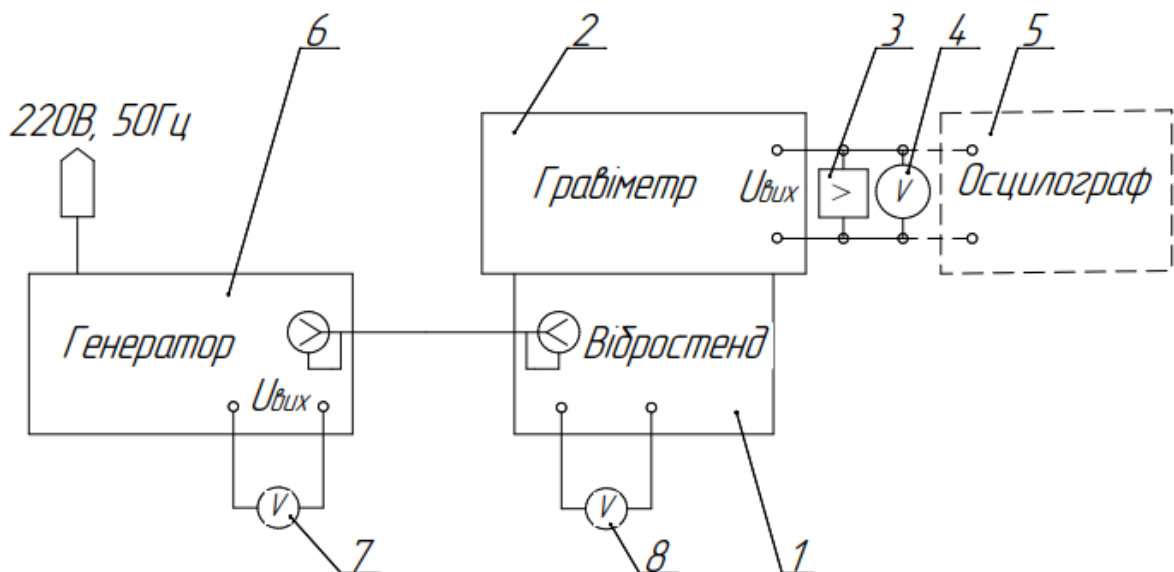


Рис.3.6. Принципова схема установки експериментальних досліджень двоканального ємнісного гравіметра[32,34]

На рис.3.6. зображено: 1 – генератор механічних коливань, 2 – ДЄГ, 3 – підсилювач, 4 – вольтметр, 5 – осцилограф, 6 – генератор змінної напруги, 7 – вольтметр реєстрації напруги живлення, 8 – вольтметр реєстрації напруги індукційного перетворювача.

Методика дослідження[11,21]:

1. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ  $U_{ДЕГ}$ , та напруги індукційного перетворювача  $U_{ВП}$ , від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора  $U_{ген} = 5В$ .

2. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ  $U_{ДЕГ}$ , та напруги індукційного перетворювача  $U_{ВП}$ , від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора  $U_{ген} = 7В$ .

3. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ  $U_{ДЕГ}$ , та напруги індукційного перетворювача  $U_{ВП}$ , від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора  $U_{ген} = 8В$ .

4. Провести дослідження амплітуди напруги з індукційного перетворювача  $U_{ВП}$  від амплітудного значення напруги генератора  $U_{ген}$  для однакових значень частоти  $f$  коливань вібростенда.

5. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу з ДГ, що контролюється вольтметром 4, від частоти резонансів вимірювальної системи  $f_{рез}$ , Гц, які задаються генератором, для  $U_{ген} = 5В$ ;  $U_{ген} = 7В$ ;  $U_{ген} = 8В$ .

### **3.3. Висновки до третього розділу**

У розділі було досліджено стійкість системи, на основі двоканального ємнісного гравіметра, а також розглянуто лабораторну установку, на якій проведено його експериментальне дослідження. Побудовано градууювальну характеристику двоканального ємнісного гравіметра автоматизованої гравіметричної системи та виявлено, що кут нахилу вимірювальної осі двоканального ємнісного гравіметра прямо пропорційно впливає на абсолютну величину похибки та вихідні характеристики у цілому. Встановлено похибку гравіметра на поверхні Землі. Експериментально

встановлено, що навіть при резонансних умовах,  $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$  рад/с ДЄГ має похибку меншу за 0,5 мГал. Експериментально визначено, що найбільша похибка ДЄГ виникає при частоті  $\omega_0 = 0.1$  рад/с, і не впливає на точність вимірювань.



## РОЗДІЛ 4

### АВТОМАТИЗОВАНА ГРАВІМЕТРИЧНА СИСТЕМА З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

#### 4.1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій

Як метод пошуку запасів корисних копалин, сучасна гравітаційна розвідка вимагає використання сучасних та інноваційних технологічних методів для отримання та обробки гравіметричних даних для прийняття рішень у режимі реального часу у складних ситуаціях. Корисні копалини можуть залягати на різній глибині, а запаси, що містять різний об'єм, можуть створювати майже однакові аномалії гравітаційного прискорення. Тому особливо серйозною є проблема підвищення точності гравіметрів, що використовуються в геологорозвідувальних роботах по добуванню цінних копалин у родовищах. Створення на їх основі швидкісних, високоточних, автоматичних вимірювальних систем, що працюють в режимі реального часу.

Аналіз відомих джерел інформації показує, що на сьогоднішній день існує ряд автоматизованих гравіметричних систем, які можна використовувати для дистанційного пошуку корисних копалин. Усі вони відрізняються структурою, точністю, швидкістю, рівнем автоматизації та принципами обробки вимірювальної інформації.

Так в роботі [35] представлена автоматична гравіметрична вимірювальна система для вимірювання аномалій гравітаційного прискорення на основі MEMS- гравіметра з більшою точністю (1 мГал) і більшою швидкістю, ніж звичайні. Однак інформація в роботі представлена фрагментарно і не дає повного уявлення про принципи роботи системи та обробки вимірювальної інформації.

У роботі [36] представлено програмно-апаратний комплекс для дослідження ємнісних гравіметрів. Показано принципіві схеми апаратно-програмних комплексів та варіанти підключення ємнісного гравіметра до комп'ютера для отримання інформації про прискорення вільного падіння. Також наведено програмний інтерфейс апаратно-програмного комплексу, за допомогою якого задаються параметри роботи вібростенда та отримують результати. Однак ця стаття містить лише апаратне забезпечення системи, запропоноване автором статті, і не надає жодних даних, що дозволяють використовувати гравіметр для використання у якості чутливого елемента у автоматизованій гравіметричній системі.

У роботі [37] розглядається варіанті супутникового інерціально-навігаційного гравіметричного комплексу, що забезпечує можливість досягнення достатньої точності векторної гравіметрії, визначення параметрів Орієнтації та навігації системи. Для платформи передбачено функціональний алгоритм роботи чутливого елемента, однак інформація подається фрагментарно, а не цілком, що ускладнює її детальне та когнітивне дослідження.

У роботі [38] представлена основна інформація про геоінформаційну систему (ГІС) RAPID, яка зосереджена на спільній обробці та аналізі наземних і космічних даних. Система поєднує інструменти ГІС загального призначення з математичним пристроєм Data Mining, орієнтовуючись на інтелектуальний аналіз великих обсягів даних, забезпечуючи можливість інтеграції різних типів багаторівневих даних та вилучення корисної інформації. Однак, оскільки ця система описує процеси прийняття рішень лише на основі заздалегідь підготовлених гравіметричних карт Землі за наявності корисних копалин, її функціональні можливості значно обмежені, і система не може використовуватися в реальному часі для нових гравіметричних досліджень раніше невідомих родовищ корисних копалин. Крім того, у статті представлено фрагментарний опис застосування методики застосування штучного інтелекту для обробки даних гравіметричної розвідки,

без пояснення структури роботи технології Data Mining щодо гравіметричної розвідки.

У роботі [39] розглянуто новий вид алгоритму розв'язання задачі оберненої гравіметричної розвідки. Вибір найкращого рішення з набору прийнятних варіантів аналізу здійснюється з використанням критеріїв оптимальності, запозичених з теорії прийняття рішень і застосованих до геофізичних задач. Обговорюється концепція отримання інформації про причини гравітаційних аномалій, в результаті чого виводиться набір локально-оптимальних рішень, а не одне оптимальне рішення оберненої задачі. Проте джерелом інформації в цій статті є евристичні припущення, що знижують надійність інформації.

У роботі [40] збільшено роль емпіричного методу у визначенні присутності корисних копалин, шляхом групування раніше відомих даних про мінерали та використання методів нечіткої логіки для збільшення швидкодії, простоти та точності гравіметричної розвідки. Досліджено емпіричний зв'язок між геологічними даними відомих мінералів і мінералами, які присутні в земній корі. Однак в роботі присутня певна декларативність та фрагментарні пояснення нечітких правил, які лежать в основі визначення наявності корисних копалин.

Отже, після розгляду джерел, можна зробити висновок, що на сьогодні відсутні комплексний та загальний підхід до розв'язання задачі автоматизації, пришвидшення та покращення якості гравіметричної зйомки місцевості.

На основі всіх перелічених недоліків, було запропоновано автоматизовану гравіметричну систему на основі двоканального ємнісного МЕМС гравіметра, що використовує нечітку логіку, як інструмент прийняття рішень.

## **4.2. Опис запропонованої автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин**

Запропонована автоматизована гравіметрична система з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин є інноваційною розробкою, яка обумовлюється такими перевагами, як [41]:

- швидкість інтерпретації гравіметричної розвідки у зрозумілий для людини вигляд;
- можливість застосування в умовах невизначеності, які виникають на первісних етапах геолого - розвідувальних робіт, а також при розвідці у важкодоступних місцях;
- точність, яка забезпечується використанням у складі системи в якості первісного вимірювального засобу прецизійного гравіметра, що може бути встановлений на безпілотному літальному апараті (наприклад, на квадрокоптері). Останнє дозволяє проводити гравіметричну розвідку у важкодоступних місцях та виконувати гравіметричну зйомку з великою роздільною здатністю;
- можливість інтеграції результатів гравіметричної розвідки з аерокосмічною зйомкою, що дозволяє з високою точністю та швидкістю в режимі реального часу визначати види корисних копалин, їх запаси та глибину залягання.

Структурна схема запропонованої авторами автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту (АГСШІ) показана на рис.4.1. АГСШІ сформована, як багаторівнева сукупність деяких технічних засобів, що мають неоднорідні властивості.[41]

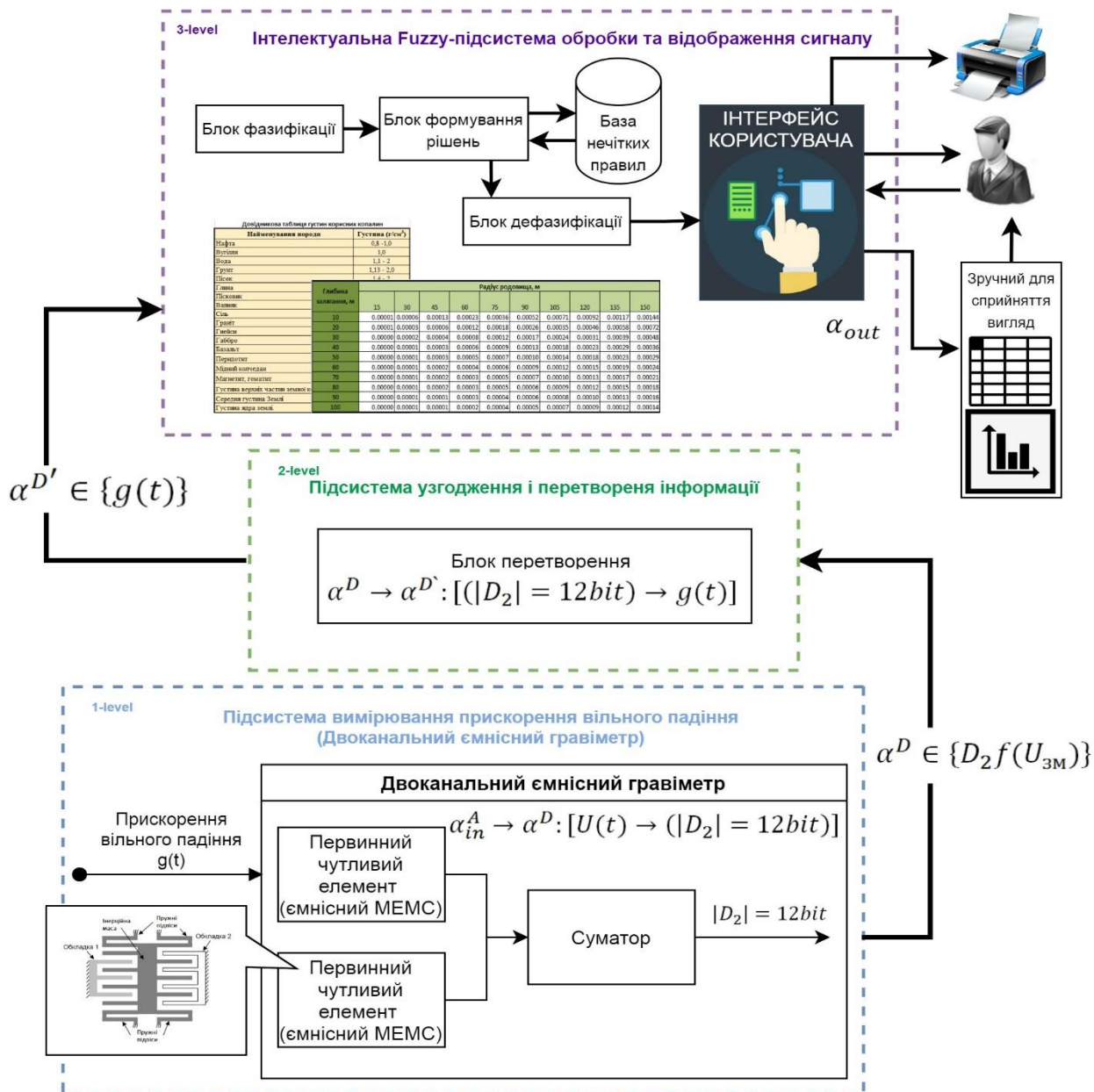


Рис.4.1 Структурна схема АГСШ [41]

Перший рівень (1-level) пропонуваної є рівнем формування вхідного вимірювального сигналу  $\alpha_{in}^A$ . Він реалізований у вигляді підсистеми вимірювання гравітаційного прискорення, основним елементом якої є двоканальний ємнісний MEMC гравіметр. У кожному каналі гравіметра встановлені ідентичні одноканальні ємнісні гравіметри (ЄГ), чутливим елементом яких є дві металеві пластини, розділені діелектриком. Одна з пластин рухома, а інша жорстко закріплена. Інерційні маси  $m_1$  і  $m_2$  прикріплені до рухомої пластини. Під дією гравітаційного прискорення змінюється відстань між пластинами конденсатора. Зміна відстані між

пластинами змінює ємність  $C$  конденсатора. Зміна ємності  $\Delta C$  на електроді чутливого елемента перетворюється на зміну напруги  $\Delta U$ . Оскільки використовується двоканальна схема, необхідно додати значення вихідної напруги на кожному виході ЕГ. Результатом є подвоєний сигнал прискорення вільного падіння.

У цілому на 1-level вимірюється значення прискорення вільного падіння, і перетворюється у цифровий двійковий 12-бітний сигнал:  $\alpha_{inA} \rightarrow \alpha_D: [U(t) \rightarrow (|D2| = 12\text{-bit})]$ ,  $\alpha_D$  – є двійковим цифровим сигналом, що несе інформацію виду  $2g(t)$ . [41]

Наступний рівень (2-level) є підсистемою узгодження та перетворення інформації. Тут відображається подвоєне значення прискорення вільного падіння  $g(t)$  шляхом перетворення 12-бітового двійкового сигналу на виході із електронного компонента у десяткову систему, яку легко використовують користувачі. Основним елементом на цьому рівні є мікрокомп'ютер, який виконує основне завдання – перетворення сигналу.

З 2-го рівня множина виміряних значень прискорення передається далі на наступний рівень (3-level) інтелектуальної Fuzzy підсистеми обробки та відображення сигналу, що представляє собою підсистему обробки вхідного сигналу та відображення ймовірності наявності корисних копалин у зручному для розуміння вигляді. [41]

Основним елементом цієї підсистеми є нечітка система прийняття рішень, до складу якої входять блоки фазифікації, дефазифікації та блоки прийняття рішень, реалізовані спеціальними програмними додатками на комп'ютері, а також основа для нечітких правил і лінгвістичних змінних. Блок фазифікації виконує завдання перетворення вхідного числового значення в ступінь відповідності лінгвістичній змінній. Блок дефазифікації перетворює вихідні значення у числові результати, а блок прийняття рішення вибирає нечітке правило і виводить кінцевий результат та екран.

У реальному часі система перетворює вхідний сигнал у вигляді прискорення вільного падіння в різницю між фактичним і теоретичним значеннями  $\Delta g$ . Різниця в прискоренні вільного падіння, так звана аномалія Буге, є основним показником наявності корисних копалин у ґрунті. Залягання на певній глибині конкретного матеріалу відомої щільності може викликати гравітаційні аномалії, які фіксуються високоточними гравіметрами. У роботі були розраховані аномалії мінералів, таких як: мідь, магнетит і вугілля. Теоретичне значення відхилення прискорення вільного падіння  $\Delta g$  було розраховано за так званою прямою задачею гравірозвідки для нескінченно довгого круглого циліндра відповідно до рівняння (4.1) [39].

$$\Delta g = \frac{2Gh\pi R^2(\sigma - \sigma_0)}{x^2 + h^2}, \quad (4.1)$$

де  $G$  – гравітаційна стала,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $h$  – глибина залягання копалини,  $\text{м}$ ,  $R$  – радіус родовища,  $\text{м}$ ,  $\sigma$  – густина копалини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\sigma_0$  – густина основної породи,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $x$  – відстань від центру мас,  $\text{м}$ .

Аномалій прискорення вільного падіння в залежності від радіусу родовища, що змінюється з кроком у  $15\text{м}$  та глибини залягання для корисних копалин: міді, магнетиту, вугілля, що змінюється з кроком у  $10\text{м}$  представлено у табл.4.1. Отримані дані є основою синтезу нечітких правил визначення залягання корисних копалин, які наведені у табл.4.2. Очевидно, що використання вже сформованих правил, дає можливість використовувати систему у режимі реального часу.[41]

Таблиця 4.1. [41]

**Аномалії прискорення вільного падіння в залежності від глибини та розміру родовища**

Глибина залягання, м	Радіус родовища, м									
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
10	0.00001	0.00004	0.00014	0.00033	0.00064	0.00110	0.00175	0.00261	0.00372	0.00510

Таблиця 4.1. Продовження

<b>20</b>	0.00000	0.00002	0.00007	0.00017	0.00032	0.00056	0.00089	0.00132	0.00188	0.00258
<b>30</b>	0.00000	0.00001	0.00004	0.00009	0.00017	0.00030	0.00047	0.00070	0.00100	0.00137
<b>40</b>	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00010	0.00018	0.00028	0.00042	0.00060	0.00082
<b>50</b>	0.00000	0.00000	0.00001	0.00003	0.00007	0.00012	0.00019	0.00028	0.00040	0.00054
<b>60</b>	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00008	0.00013	0.00020	0.00028	0.00038
<b>70</b>	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00010	0.00015	0.00021	0.00029
<b>80</b>	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003	0.00005	0.00008	0.00011	0.00016	0.00022
<b>90</b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00009	0.00013	0.00017
<b>100</b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00007	0.00010	0.00014

Таблиця 4.2. [41]

**Нечіткі правила визначення наявності певного виду корисних копалин**

Назва нечіткого правила	Формалізована форма нечіткого правила	Лінгвістична форма нечіткого правила
П1	П1: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00004$ ТО $\lambda = Cu \wedge R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g=0.00004$ , то це відповідає заляганняю міді радіусом 60 м
П2	П2: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00012$ ТО $\lambda = Cu \wedge R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g=0.00012$ , то це відповідає заляганняю міді радіусом 90 м



Таблиця 4.2. Продовження

П3	П3: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.00030$ ТО $\lambda = \text{Cu} \text{ \AA}$ $R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.0003$ , то це відповідає заляганням міді радіусом 120 м
П4	П4: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.00058$ ТО $\lambda = \text{Cu} \text{ \AA}$ $R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.00058$ , то це відповідає заляганням міді радіусом 150 м
П5	П5: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.00006$ ТО $\lambda = \text{Fe} \text{ \AA}$ $R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.00006$ , то це відповідає заляганням магнетиту радіусом 60 м
П6	П6: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.00020$ ТО $\lambda = \text{Fe} \text{ \AA}$ $R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.00020$ , то це відповідає заляганням магнетиту радіусом 90 м
П7	П7: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.000470$ ТО $\lambda = \text{Fe} \text{ \AA}$ $R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.00047$ , то це відповідає заляганням магнетиту радіусом 120 м
П8	П8: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = 0.00092$ ТО $\lambda = \text{Fe} \text{ \AA}$ $R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0.00092$ , то це відповідає заляганням магнетиту радіусом 150 м
П9	П9: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = -0.00004$ ТО $\lambda = \text{C} \text{ \AA}$ $R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0.00004$ , то це відповідає заляганням вугілля радіусом 60 м
П10	П10: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = -0.00014$ ТО $\lambda = \text{C} \text{ \AA}$ $R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0.00014$ , то це відповідає заляганням вугілля радіусом 90 м
П11	П11: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = -0.00032$ ТО $\lambda = \text{C} \text{ \AA}$ $R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0.00032$ , то це відповідає заляганням вугілля радіусом 120 м
П12	П12: ЯКЩО $L = 50 \text{ \AA}$ $\Delta g = -0.00063$ ТО $\lambda = \text{C} \text{ \AA}$ $R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0.00063$ , то це відповідає заляганням вугілля радіусом 150 м

### **4.3. Висновки до 4 розділу**

У четвертому розділі було створено автоматизовану гравіметричну систему на основі двоканального ємнісного МЕМС гравіметра з елементами штучного інтелекту, а саме нечіткої логіки. Розроблено структурну схему та набір правил нечіткої логіки для визначення наявності корисних рудних копалин. Як вхідні величини, для створення прогнозу використовується лише значення аномалії прискорення вільного падіння. Можна сказати, що за даними гравірозвідки виконаної розробленою системою можна з певною ймовірністю сказати про наявність корисних копалин. Прогноз складається із ймовірної копалини, глибини її залягання та потужності родовища. При цьому час обробки сигналу та швидкодія залишаються на високому рівні у порівнянні з відомими аналогами. Подальші уточнення кількості, глибини та виду корисної копалини потребує подальшого дослідження за допомогою інших геолого-геофізичних методів, наприклад, буріння тестових скважин, використання медів дистанційного спектрального зондування Землі із супутника. Отже, роблячи висновок, можна сказати, що система має перспективність та повинна бути об'єктом подальших досліджень.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО МЕМС ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ»

Розглянувши в попередніх розділах систему із гравіметричної розвідки на основі двоканального ємнісного гравіметра, в цьому розділі буде наведений маркетинговий аналіз цього проекту магістерської дисертації для визначення можливості виходу продукту на ринок та його реалізації. Для аналізу використаний алгоритм наведений в [42].

#### 5.1. Опис ідеї та технологічний аудит проекту

У таблиці 5.1. зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1.

#### Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Автоматизована гравіметрична система із елементами штучного інтелекту.	1. Гравіметрія	Забезпечення більш високої точності гравіметричної розвідки
	2. Перетворення сигналу у зрозумілий для людини вигляд	Зручність та простота
	3. Прогноз розташування можливих ресурсів у недрах Землі	Економічність

Отже, запропонована автоматизована система гравіметричної розвідки, що забезпечить високу точність, та простоту у використанні. В таблиці приведені основні напрямки застосування запропонованої системи. Основними споживачами є приватні та державні установи де є необхідність вимірювати з високою точністю аномалію прискорення вільного падіння.

Далі в таблиці 5.2. наводиться інформаційна картка стартап проекту

Таблиця 5.2.

### Інформаційна картка стартап-проекту

Назва проекту	Автоматизована гравіметрична система із елементами штучного інтелекту.
Автори	Нічик В. С., Безвесільна О. М.
Анотація	Система дозволяє збільшити точність за рахунок використання штучного інтелекту.
Термін реалізації	2 роки
Необхідні ресурси	Людські, фінансові.
Опис проблеми, яку вирішує стартап - проект	На даний час точність визначення аномалії прискорення вільного падіння у динаміці не задовольняють кінцевого користувача.
Ціль	Покращення точності та швидкості вимірювання аномалій ПСТ.
Очікуваний результат	Швидке та точне визначення аномалій за допомогою використання штучного інтелекту а також нових високоточних сенсорів, що мають менші похибки.

Далі проведемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг, визначимо чим виріб в даній роботі відрізняється від існуючих аналогів, порівняно з конкурентами.

Для цього визначимо:

- Перелік техніко-економічних властивостей та характеристик
- Список конкурентів або аналогів чи товарів-замінників, що існують на ринку
- Порівняльний аналіз показників.

Таблиця 5.3.

### Визначення слабких сильних та нейтральних характеристик ідеї.

№ n/n	Техніко-економічні характеристики ідеї	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>				<i>W (слабка сторона)</i>	<i>N (нейтральна сторона)</i>	<i>S (сильна сторона)</i>
		<i>Мій проект</i>	<i>LG-1 Galileo</i>	<i>Analog Devices ADXL3 26BCPZ</i>	<i>Analog Devices ADXL203 CE-REEL</i>			
1	Автоматизованість	+	-	-	-	-	-	+
2	Точність	Висока	Висока	Середня	Середня	-	+	+

Таблиця 5.3. Продовження

3	Діапазон вимірювання	Середній	Високий	Середній	Висока	-	-	+
4	Зручність використання	Висока	Середня	Середня	Середня	+	-	-
5	Надійність	Висока	Висока	Середня	Висока	-	-	+

З приведенного переліку сильних, слабких і нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару можна зробити висновок, що продукт має переваги над конкурентами, оскільки на відміну від інших систем, мій проект повністю автоматизований.

Для проведення технологічного аудиту необхідно зробити аналіз таких складових як:

- Технологія за якою буде виготовлений товар, тобто технологія для характеристики товару, що буде досліджуватись.

- Існування таких технологій (наявність на сьогодні технологій, щоб довести доцільність використання винайденої системи).

- Доступність таких технологій (чи можна отримати доступ до технології, чи не є вона надто дорогою, секретною тощо).

Таблиця 5.4.

### Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Автоматизована гравіметрична система з елементами штучного інтелекту	Розробка компонентів системи та програмного забезпечення	Наявні	Доступна

Таблиця 5.4. Продовження

	Випробовування та виготовлення готового програмного забезпечення	Наявні	Доступна
	Моделювання установки	Наявні	Доступна
	Перевірка системи в різних умовах роботи	Наявні	Доступна
	Виготовлення стенду	Наявні	Доступна
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Методика реалізації ідеї проекту спирається на створення компонентів системи та програмного забезпечення, основним компонентом якої буде автоматизована гравіметрична система, кінцеві рішення в якій будуть формуватись за допомогою штучного інтелекту</p>			

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що ідея можлива для створення та всі технології є доступні. Вибір БПЛА та гравіметра для вимірювання є найпріоритетнішими задачами, а також в подальшому це зменшить складність майбутньої модернізації.

## 5.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному розділі проводиться аналіз ринкових можливостей які можна використати під час впровадження проекту на ринок та загроз які можуть бути перешкодами для реалізації проекту. Даний аналіз дозволить зробити плани що розвитку проекту з урахуванням стану ринку, пропозицій конкурентів та потреб потенційних клієнтів. Аналіз представлено в таблиці 5.5.

**Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту**

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2000000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Практичне застосування та сертифікація, наявність конкурентів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

За результатами таблиці можна зробити висновки, що вихід на ринок є рентабельним. Високий процент рентабельності та загальний обсяг продажів дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку системи. Мала кількість гравців свідчить про неважкий вихід на ринок.

Далі визначимо потенційні групи клієнтів, сформулюємо перелік вимог до товару для кожної з груп та визначимо характеристики груп клієнтів (таблиця 5.6.)

**Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту**

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1.	Розробка нової виміральної автоматизованої системи. А також зміна застарілих підходів вимірювання аномалій ПСТ.	Приватні та державні установи де є необхідність високоточного вимірювання аномалій ПСТ	Фінансові можливості підприємств або приватних компаній	-висока точність результатів вимірювання - надійність системи - високий діапазон вимірювання - висока чутливість

Формування ринку визначається потребою в розробці нової вимірювальної системи, а також зміні застарілих методів та підходів у вимірюваннях аномалій прискорення вільного падіння. Основними користувачами методики є приватні та державні установи де є необхідність точного вимірювання аномалії Буге та визначення по них наявності корисних викопних речовин у породі. Головними вимогами до методики досліджень є висока точність результатів вимірювання, надійність системи, високий діапазон вимірювання та висока чутливість системи.

Далі складемо таблицю факторів ринкового середовища, що перешкоджають (табл.5.7.) ринковому впровадженню проекту, та факторів, що сприяють йому (табл. 5.8.).

Таблиця 5.7.

### Фактори загроз

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Зріст конкуренції	Поява конкурентів	Покращення власного продукту, активна маркетингова діяльність
2.	Економічна нестабільність	Економічний стан країни, де виробляється продукт, мала купівельна спроможність населення	Спрощення комплектації системи, застосування більш дешевих складових. Вихід на зарубіжний ринок, щоб зменшити залежність від економіки в певному регіоні.
3.	Якість	Відсутність надійних постачальників високоякісного обладнання, незадоволення якістю приладу	Покращення якості до рівня необхідності клієнту, Широкий асортимент продукції, із кастомними складовими, щоб забезпечити відповідну якість клієнту.
4.	Технології	Винайдення нових методів вимірювання	Пошуки шляхів впровадження нових методів та засобів вимірювання
5.	Відсутність попиту	Ймовірність того що клієнт не буд купувати товар	Визначення потреб клієнтів, подача у доступному для покупців вигляді (реклама)



У таблиці 5.7. описані основні види загроз та можна сказати, що найбільшим фактором загроз є зріст конкуренції, тому потрібно завчасно продумувати та покращувати характеристики системи без суттєвої зміни ціни, хоча маркетинг теж граний метод знайти нових клієнтів та не відпустити старих. Також одним з найголовніших факторів якість продукту та економічний стан країн де буде проводитись розробка та продаж системи, тому є необхідність в майбутньому виходити на зарубіжний ринок.

Можливості наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8.

### Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Збільшення попиту	Збільшення виробництва товару та товаробігу, збільшення клієнтів.	Задоволення попиту на систему. Притягнення нових інвестицій
2.	Необхідність модифікацій	Потреба в унікальних можливостях приладу	Розширення функціоналу системи.
3.	Нові групи клієнтів	Поява нових покупців	Визначити потреби нових клієнтів
4.	Вихід на міжнародний ринок	Зацікавленість продуктом за кордоном	Відкриття нових відділів продажу за кордоном
5.	Розробка веб-додатку	Підвищення якості обслуговування, збільшення попиту	Якісніше обслуговування клієнтів

У таблиці 5.8. наведені основні можливості. Головним фактором можливостей є збільшення попиту на продукт, це призведе до збільшення кількості нових клієнтів, а отже і кількості нових інвестицій до продукту. Освоєння міжнародного ринку також є одним з головних, оскільки дана можливість дає змогу збільшити кількість клієнтів, та залишатися стабільною не зважаючи на економіку конкретної країни.

Далі необхідно проввести аналіз пропозиції, а саме визначити загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.9.).

### Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: - чиста конкуренція	Невелика конкуренція	Можливість прогнозувати зміни на ринку. Можливість випереджувати конкурентів шляхом покращення товару
2. За рівнем конкурентної боротьби: - міжнародний	Можливість знаходження замовників з закордону, залучення іноземних інвестицій	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Конкуренція між підприємствами в межах однієї галузі	Маркетингова діяльність по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду	Задоволення потреб клієнтів, покращення товару
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	Від зміни ціни при закупці комплектуючих залежить ціна всієї системи	Пошук постачальників, які пропонують менші ціни на компоненти приладу, пошук аналогів компонентів, що дорожчають
6. За інтенсивністю - марочна	Конкурентні компанії не пропонують продукт з подібними комплектуючими системи	Маркетингова діяльність; зниження ціни на товар; покращення якості продукту; створення власної торгової марки

В табл. 5.9. приведений аналіз основних рис конкуренції на ринку та їх вплив на діяльність підприємства, і також наведені можливі дії компанії щоб продовжувати бути конкурентоспроможною. Аналіз пропозицій показав, що запропонована система демонструє високу конкурентоспроможність. На ринку є чиста конкуренція через не велику кількість конкурентів. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний з внутрішньогалузевою ознакою. За видами товарів конкуренція є товарно-видовою, а за характером конкурентних переваг – ціновою.

Далі проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 5.10.).

Таблиця 5.10.

### Аналіз конкуренції в галузі за М.Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	«Геодевайс»	Analog Devices	Analog Devices	Державні та приватні установи, де є необхідність у високоточному вимірюванні аномалій ПСТ	Не автоматизовані системи, для обслуговування яких необхідні більші ресурси
Висновки:	Конкуренція не є великою. Товари схожі, проте є достатньо різні методи застосування.	Є можливість виходу на міжнародний ринок. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальник не диктує умови на ринку	Клієнти не диктують умови роботи на ринку в залежності від технологічного процесу	Обмежень не буде, адже продукти-замінники мають більшу залежність від спеціалістів

Проаналізувавши результати Таблиці 5.10. можна сказати що на ринку можна працювати адже конкурентів є відносно не багато. Товари-замінники не можуть в повній мірі задовольнити потреби клієнтів, оскільки є не автоматизованими, що потребує залучення більшої кількості висококваліфікованих працівників.

На основі аналізів проведених вище (в табл. 5.10.) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 5.11.), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.3.), вимог споживачів до товару (табл. 5.6.) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.7.-5.8.)

### Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Точність	Висока точність вимірювання
2.	Діапазон вимірювання	Широкий діапазон вимірювання
3.	Ціна	Ціна на товар може бути конкурентною перевагою, оскільки можна закупати комплектуючі по вигідній ціні, і від цього ціна всієї системи буде вигіднішою для користувача ніж у конкурентів
4.	Автоматизованість	Можливість обробки вихідного сигналу штучним інтелектом, що дозволяє істотно пришвидшити процес дослідження
5.	Надійність та простота	Довгий строк служби системи

В таблиці 5.11. наведені основні фактори конкурентоспроможності. З неї можна зробити висновок, що висока точність, діапазон вимірювання та ціна є головними факторами конкурентності, що дозволить зайняти високе місце на ринку. Також в даній системі є можливість обробки вихідного сигналу штучним інтелектом, що дозволяє істотно пришвидшити процес дослідження.

Із визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.11.) проведемо аналіз сильних та слабких сторін системи (табл. 5.12.).

### Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Геодевайс»						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Точність	16		+					
Діапазон вимірювання	19						+	
Зручність використання	17				+			

Таблиця 5.12. Продовження

Ціна	15		+				+	
Автоматизованість	18							
Надійність та простота	17				+			

Отже при порівнянні системи з конкурентами можна зробити висновки, щодо сильних та слабких факторів конкурентоспроможності. До сильних сторін системи відноситься: діапазон вимірювання, автоматизованість системи, також на непоганому рівні є зручність використання та надійність і простота. До слабких сторін можна віднести ціну.

Останнім етапом ринкового аналізу проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.13.) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.12.).

Таблиця 5.13.

### SWOT - аналіз стартап-проекту

<b>Сильні сторони:</b> Точність Діапазон вимірювання Зручність використання Автоматизованість Надійність та простота	<b>Слабкі сторони:</b> Залежність від постачальників Поява нових технологій Відсутність торгової марки Ціна
<b>Можливості:</b> Збільшення попиту Необхідність модифікацій Нові групи клієнтів Вихід на міжнародний ринок Розробка веб-додатку	<b>Загрози:</b> Конкуренція Економічна нестабільність Якість Технології Відсутність попиту

Провівши SWOT-аналіз визначенні можливості, загрози які передбачаються сильними та слабкими сторонами. Слабкими сторонами є залежність від постачальників, від ціни на комплектуючі, поява нових технологій та відсутність торгової марки, але наведені вище переваги повністю нівелюють дані недоліки. До переваг можна віднести діапазон вимірювання та автоматизованість системи.

За SWOT-аналізом розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх реалізації. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.14.).

Таблиця 5.14.

#### Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1.	Покращення надійності	Висока	1-3 місяців
2.	Пошук інвестицій	Висока	3-6 місяців
3.	Збільшення ринку збуту завдяки маркетингу	Середня	1-2 роки
4.	Вихід на міжнародний ринок	Висока	1-2 роки

Провівши аналіз (табл. 5.14.), можна зробити висновок, що ймовірність отримання ресурсів є досить великою. Важливою задачею є покращення надійності, що покращить систему. Головними джерелами ресурсів є інвестиції та маркетингова діяльність. Найкращою альтернативою буде вихід на міжнародний рівень, проте час для виходу не займе більше ніж 1-2 роки.

### 5.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

Першим кроком для розроблення ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку – опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.15.).

Таблиця 5.15.

#### Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Геологія	+	+	Середня	+
2.	Робототехніка	+	+	Висока	-
3.	Гравіметрія	+	+	Середня	-
4.	Приватні та державні установи де є необхідність вимірювання ПСТ	+	+	Середня	+
Які цільові групи обрано: приватні та державні установи де є необхідність точного визначення значення ПСТ, а також його аномалій.					

Після Проведення опису цільових груп, можна перейти до самого вибору цільової. Так як гравіметрія мають високу планку входу, обрано приватні та державні установи де є необхідність точного вимірювання значень ПСТ та його аномалій, де конкуренція є не великою та є можливість легкого виходу на ринок. Для даних організацій будемо пропонувати свою систему для автоматизації процесу гравірозвідки.

Для роботи в обраних сегментах необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.16.).

Таблиця 5.16.

**Визначення базової стратегії розвитку**

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1.	Підвищення надійності	Стратегія диференційованого маркетингу	Підбір кращих матеріалів приладу для забезпечення надійності	Стратегія диференціації

В якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання унікальних властивостей продукту за вимогою користувача, що робить продукт особливим на відміну від конкурентів.

Далі виберемо стратегії конкурентної поведінки. Для цього необхідно відповісти на запитання наведені в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17.

**Визначення базової стратегії конкурентної поведінки**

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1.	Проект не є першопрохідцем	Компанія буде забирати існуючих споживачів та шукати нових	Компанія не буде копіювати характеристики товару закордонного конкурента.	Стратегія виклику лідера

Обрана стратегія конкурентної поведінки – стратегія виклику лідера, Оскільки даний продукт не є першопрохідцем та має суттєві переваги по



відношенню до свого прямого конкурента. Стратегія полягає в тому, що необхідно протистояти лідеру та виробляти кращий продукт, який може зайняти найвищу позицію на ринку.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (Табл.5.18.) яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 5.18.

### Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1.	Точність	Стратегія диференціації	Висока точність	Стабільність показників, високий запас надійності
2.	Діапазон вимірювання	Стратегія диференціації	Широкий діапазон вимірювання	Стабільність показників на всьому діапазоні вимірювання, високий запас надійності
3.	Ціна	Стратегія диференціації	Доступна цінова політики	Якість, гарантія, обслуговування

За результатами даної таблиці можна зробити висновки, головними вимогами до товару є точність, діапазон вимірювання та ціна. Компанія працюватиме за диференційною стратегією, та стратегією зайняття конкурентної сфери, оскільки на ринку присутня мала кількість конкурентів, то споживач готовий сприйняти товар та не має великої складності до виходу на ринок.

## 5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.19. підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару. [42].

Таблиця 5.19.

### Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	Потреба в точній автоматизованій системі для гравірозвідки	Висока точність, автоматизованість, широкий діапазон вимірювання.	Висока точність на всьому діапазоні вимірювання

Висока точність на всьому діапазоні вимірювання, автоматизованість системи, а також широкий діапазон вимірювання дає переваги над конкурентами.

Далі необхідно розробити три рівневу маркетингову модель товару (табл. 5.20.)

Таблиця 5.20.

### Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Пропонується автоматизована система для калібрування тензорезисторів, для знімання показників деформації використовується оптична система		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Точність вимірювання	М	Тх
	2. Діапазон вимірювань	Нм	Тх
	3. Автоматизація використання	М	Тл

Таблиця 5.20. Продовження

	Якість: Сертифікати відповідності ДСТУ
	Пакування: відповідно до стандартів
	Марка: «AutoGeoSys»
III. Товар із підкріпленням	До продажу: комунікація з клієнтами для актуальності отриманих результатів, усунення неполадок, покращення якості приладу
	Після продажу: перевірка, обслуговування, встановлення системи, розробки нових покращених модифікацій та модернізації системи.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентом	

В таблиці 5.20. ми отримали опис трьох рівнів моделі за якими ми можемо прийти до висновку, щодо призначення товару, характеристики закладені у 2-му рівні роблять даний прилад унікальним серед його конкурентів. Патентування програмних та методологічних рішень слугує захистом від копіювання. Також товар повинен бути запатентованим для захисту від копіювання.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз на ціни товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.21.).

Таблиця 5.21.

### Визначення меж встановлення ціни

№ n/n	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	750-2600 ум.од	700-3500ум.од	8000-16000 ум.од	Нижня межа: 800 ум.од Верхня межа: 4000 ум.од

Встановлена ціна на продукт 800 – 4000 ум.од. Така ціна відповідає характеристикам товару і є рівною ціні на товари конкурентів. Також з огляду на рівень доходів цільової групи споживачів ціна для них є доступною.

Стартап-проект - це створення бізнес-моделі комерціалізації науково-технічних розробок. Побудова конкурентної на ринку бізнес-моделі є

ефективним інструментом вирішення поставлених у роботі задач і представляє структуру найважливіших елементів бізнес-проекту та є джерелом інноваційних ідей і підходів, які можуть бути застосовані в унікальному поєднанні компонентів [10,11]. На (табл. 5.22) представляємо структуру бізнес-моделі автоматизованої гравіметричної системи, яка використовуватиме штучний інтелект для прийняття рішень.

Таблиця 5.22

### Структура бізнес моделі обладнання (технології)

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Цінність пропозиції	Взаємовідносини з клієнтами	Споживчі сегменти
Analog Devices	1.Реалізація системи автоматизованої гравіметрії 2.Надання підтримки до власної гравіметричної системи 3.Ремонтні послуги власної системи	1.Пропозиція на ринку цінна, оскільки існуючі аналоги не мають того рівня автоматизації та зручності, що доступно у нашій автоматизованій гравіметричній системі. А використання штучного інтелекту, взагалі, робить продукт унікальним.	1. Клієнти отримуватимуть весь спектр послуг, від поставки новітнього обладнання до його налагодження та налаштування, а також навчання спеціалістів для роботи.	1. Державні установи та приватні компанії, що займаються безпосередньо гравірозвідкою місцевості на наявність корисних копалин.
	Ключові ресурси 1. МЕМС гравіметри 2. Безпілотники 3. Монтажні елементи 4. Конструктивні елементи		Канали збуту 1.Продаж на власній торговій платформі. 2.Доступність покупки через інтернет	
Структура собівартості 1.Витрати разові (капітальні): Дослідження, розробка креслень та документації 2.Витрати постійні: придбання складових до системи 3.Витрати змінні: Вартість обслуговування інтернет-сайту, вартість комунальних платежів.			Потоки надходження доходу. Дохід від продажу розробленої системи, показ реклами на власному сайті.	

Далі виконаємо визначення оптимальної системи збуту (табл. 5.23.) в межах якої приймається рішення.

Таблиця 5.23.

### Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1.	Замовлення заздалегідь	Продаж товару замовнику з подальшим обслуговуванням	Пряма	Пряма

У таблиці 5.22. видно що використовувати прямий канал збуту буде найбільш вигідним для компанії, оскільки основним каналом збуту є продаж готових до використання систем. Найефективнішою системою збуту є пряма, без залучення посередників між виробником та споживачем. Замовлення товару та комплектуючих реалізовано за допомогою сайту.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.24.) [42].

Таблиця 5.24.

### Концепція маркетингових комунікацій

<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
Отримання товару, який буде відповідати специфічним умовам роботи	Мобільний зв'язок, Інтернет, виставки, конференції,	Точність, широкий діапазон вимірювання, Стабільність показань, автоматизованість	Показати покупцю перевагу над конкурентами, Розповсюдити інформацію про товар	Висвітлення його основних характеристик та переваг над конкурентами, вимірювання

Результатом таблиці 5.23. є маркетингова програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки. Концепція маркетингової комунікації спрямована на залучення нових клієнтів за допомогою реклами, мобільного зв'язку інтернету, виставок та конференцій [42].

Розглянемо виробничий план стартап-проекту. Сировина, матеріали та комплектуючі наведені в таблиці 5.25.:

Таблиця 5.25.

### Матеріали та їх постачальники

<i>Найменування видів сировини, матеріалів та комплектуючих виробів</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Ціна за одиницю</i>	<i>Умови постачання</i>
1. МЕМС Гравіметр ММА845Х	Senith Electronix	10000	2 шт
2. Плата	ElectroDevices	1000	...
3. Мікропроцесор	AMD	10000	...
4. Конструктивні елементи, дроти	InterElectro	2000	...
5. БПЛА	MSI	17000	...
Разом		40000	...

Отже з таблиці 5.24. може зробити висновок, що для виготовлення системи необхідно близько 40000 грн, з яких 10000 грн. йде на чутливий елемент системи вимірювання аномалій ПСТ, а також 17000 на БПЛА

Потреба в обладнанні та технічних засобах розглянута в таблиці 5.26.

**Потреба в обладнанні та технічних засобах**

<i>Найменування обладнання</i>	<i>Кількість</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Умови постачання</i>	<i>Вартість, грн</i>
1. Зварювальний апарат	1	Tesla Weld		10000
2. Комп'ютер	1			30000
Разом	2			40000

Отже, для реалізації даного стартапу необхідно дві одиниці обладнання, серед яких зварювальний апарат та комп'ютер на загальну суму 40 тис.грн.

Далі проведемо оцінювання вартості стартапу. Для цього необхідно зробити оцінювання факторів успішності стартапу (табл. 5.26.). Показник фактору розраховується як добуток максимального значення фактору на значення фактору стартапу.

Таблиця 5.26

**Оцінка факторів успішності стартапу.**

<i>Фактори для порівняння</i>	<i>Діапазон</i>	<i>Стартап, у який заплановано інвестиції</i>	<i>Фактор</i>
Розмір ринку	20% max	125%	0.25
Сила управлінської команди	30% max	125%	0.38
Продукт і технологія	15% max	100%	0.2
Конкурентне середовище	20% max	150%	0.30
Необхідність у додаткових раундах фінансування	5% max	100%	0.1
Маркетинг, канали продажів, партнерство	10% max	100%	0.1
Разом			1.33

Підсумуючи показник фактору визначимо вартість стартапу як добуток суми вартості стартапу на середню оцінку. Вартість стартапу =  $1,33 \cdot 3$  тис. дол. = 4 тис дол.

## 5.5. Висновок до 5 розділу

Розробляючи стартап-проект були виконані етапи необхідні для аналізу ринку, вибору стратегій для впровадження продукту на ринок. Також була проведена оцінка ризиків які могли повпливати на проект та зупинити його просування на ринку.

В ході роботи було визначено що попит на автоматизований товар є в декількох галузях, таких як; гравіметрія(військова, цивільна), геологія, приватних та державних установ де є необхідність у точній вимірюванні ПСТ та аномалій Буге.

Провівши аналіз усіх можливостей запуску на ринок, мною було виявлено те, що ринок є привабливим для товару та може стати конкурентоспроможним, оскільки основні конкуренти мають видимі недоліки. Проте все ж основним ризиком для ідеї є конкуренція. Було визначено можливу реакцію компанії на ризики і це покращення надійності продукту та вдосконалення автоматизованої системи вимірювання гравіметричних аномалій на основі двоканального ємнісного гравіметра для гравіметрії із використанням безпілотного літального апарату із ручним або машинним керуванням та застосуванням штучного інтелекту для прийняття рішень щодо наявності корисних копалин у породі.

Основна можливість була обрана, як збільшення попиту продукту, а також вихід на міжнародний ринок, що може призвести до подальшого збільшення клієнтів та потоку інвестованого в проект капіталу, а для забезпечення цього, можлива реакція компанії – це покращення технічних, технологічних, швидкісних, точнісних характеристик виготовленого приладу.

Розроблена бізнес-модель проекту по автоматизованій гравіметричній системі з елементами штучного інтелекту, яка дозволяє комерціалізувати винайдену науково-технічну розробку. Після розробки бізнес-моделі було визначено структуру найважливіших елементів бізнес-проекту, та знайдено нові ідеї та підходи до реалізації продукту.



Проводячи аналіз усіх параметрів конкуренції на ринку, можна сказати, що конкуренція є не великою, існують виходи на міжнародний ринок, використання товару повністю можливе у різних сферах. При подальшому аналізі можна побачити, що товари-замінники не зможуть повністю задовольнити потреби клієнтів. Також було розроблено аналіз сильних та слабких сторін, до сильних сторін відносяться точність, діапазон вимірювання, атоматизованість системи, слабкі сторони – надійність, ціна.

Розроблена ринкова стратегія проекту а також обрані цільові групи – державні та приватні структури що займаються гравірозвідкою, які мають потребу у точному вимірюванні аномалій ПСТ. Також було обрано диференціацію як основну стратегію розвитку.

Після розробки маркетингової програми проекту було встановлено межі цін на товар. Також визначені фактори успішності стартапу за допомогою яких було визначено вартість стартапу яка дорівнює 4 тис.дол.

Отже можна зробити висновок що товар доцільний для використання в якості предмета стартап-проекту.

## ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації було розглянуто автоматизовану гравіметричну систему на основі нового двоканального ємнісного МЕМС гравіметра з елементами штучного інтелекту, а саме нечіткої логіки, як системи прийняття рішень.

Розпочато було з пошуку та огляду безпілотних літальних апаратів та патентних даних по відомих типах авіаційних гравіметрів, в результаті чого визначено, що наявні нині у відкритому доступі авіаційні гравіметри не мають потрібної точності, аби бути застосованими у автоматизованих гравітаційних системах на основі безпілотних літальних апаратів.

Система із використанням одноканального ємнісного гравіметра має ряд переваг, таких як: малі габарити та вага; лінійність вихідної характеристики; висока чутливість і стійкість показань. Однак, ця система має і недоліки: наявність шумів; невелика потужність вихідного сигналу; наявність залишкових похибок; недостатня точність в 1 мГал. Але основним недоліком одноканального ємнісного гравіметра є інструментальні похибки, а також наявність похибки, яка спричинена впливом вертикального прискорення.

Показано, що новий запропонований двоканальний ємнісний гравіметр, за рахунок використання двох каналів із установленими в них одноканальними ємнісними гравіметрами практично повністю виключає вплив зовнішніх фізичних факторів а також вертикального прискорення.

Точність у порівнянні з відомими авіаційними гравіметрами зростає у 2 рази, до 0,5 мГал. Використання високоточного гравіметра у автоматизованій гравіметричній системі підвищує її точність та розширює спектр використання.

Штучний інтелект, представлений у даній роботі нечіткою логікою, справляється із задачами класифікації корисних копалин, спираючись лише на значення аномалії прискорення сили тяжіння. А подальша розробка та дослідження автоматизованої гравіметричної системи є безсумнівно перспективним рішенням на ринку автоматизованих систем.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. UVS International = Міжнародної асоціації безпілотних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://uvs-international.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=204&Itemid=284](http://uvs-international.org/index.php?option=com_content&view=article&id=204&Itemid=284)
2. Lum CW, Gauksheim K, Deseure C, Vagners J, McGeer T Assessing and estimating risk of operating unmanned aerial systems in populated areas. In Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach. – 2011.
3. Scheduling S, Finn A Developments and challenges for autonomous unmanned vehicles: A compendium s.1. Springer Sci & Business 9. – 2010.
4. Hejduk M The use of unmanned aerial vehicles - drones supply courier. Thesis Inzynierska. Wroclaw. – 2015.
5. Free3d MQ-1 Predator (БПЛА) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://free3d.com/ru/3d-model/mq-1-predator-uav-2158.html>
6. Bayraktar TB2 Ukrainian Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://ua.wikipedia.org/wiki/Bayraktar\\_TB2](https://ua.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_TB2).
7. Army Technology Bayraktar TB2 Tactical UAV [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.army-technology.com/projects/bayraktar-tb2-tactical-uav/>. – 2019.
8. Defense Express На що здатні турецькі БПЛА Bayraktar TB2 і як їх використовує Україна у війні з рашистами: електронний журнал [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/smert\\_z\\_neba\\_vijskovi\\_eksperti\\_pro\\_mozhливosti\\_bayraktar\\_tb2\\_u\\_borotbi\\_z\\_rosijeju-7062.html](https://defence-ua.com/weapon_and_tech/smert_z_neba_vijskovi_eksperti_pro_mozhливosti_bayraktar_tb2_u_borotbi_z_rosijeju-7062.html) – від 24 квітня 2022 р.
9. Bayraktar TB2 Baykar Tech: офіційний сайт розробника [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>.

10. DJI Phantom 2-vision: офіційний сайт розробника [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.dji.com/phantom-2-vision-plus>
11. 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.
12. Gramert, W. R. Thirdgenerationaerogravitysystem / W.R.Gramert // International Associationof Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly –Boulder, Colorado, 1995.
13. Harrison J. C. The LST Airborne Gravity System / J. C. Harrison, J. D. MacQueen, A. C. Rauhut, J. Y. Cruz // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, – Boulder, Colorado, 1995.
14. Wei, M. Analysis of GPS-derived acceleration from airbornetests / M. Wei, K. Schwarz // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, – Boulder, Colorado, 1995.
15. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.
16. Опис до патенту на корисну модель, Гіронапівкомпас, UA 5413 МПК 2009 G01C 19/00.
17. Безвесільна О.М. Аналіз основних типів гравіметрів АГС / О.М. Безвесільна, Л.О. Чепюк // ВІСНИК ЖДТУ. 2013. № 3 (66), с. 52-61.
18. 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. No 24. – 5 с.

19. Пат. 109746 Україна. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Л.О. Чепюк //Опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.

20. О.М. Безвесільна, Гравіметр авіаційної гравіметричної системи нового типу / О.М. Безвесільна, К.С. Козько, 2014.

21. Нічик, В. С. Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотного літального апарату : дипломний проєкт ... бакалавра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Нічик Віталій Сергійович. – Київ, 2020. – 77 с.

22. Пат. 2253882 Россия, МПК G 01 V 7/02. Гравиметр / А.П. Быков, О.Е. Енина, В.П. Кулеш, Л.М. Москалик.

23. Пат. 1121639 РФ, МПК G 01 V 7/12. Гравиметр / Е.И. Попов, В.П. Матюнин, А.Б. Манукин, В.Н. Конешов, Л.К. Железняк, Г.А. Гусев. – заяв. 22.06.82; опубл. 30.10.84.

24. Безвесільна, О.М.; Красниця, Є.М., Ємнісний МЕМС чутливий елемент стабілізатора озброєння: II Міжнародна науково-технічна конференція. – ЖДТУ, 2017. - Режим доступу: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/7214>

25. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых ёмкостных МЕМС – акселерометров [Электронный ресурс] / Режим доступа:[http://www.kite.ru/articles/sensor/2006\\_4\\_28.php](http://www.kite.ru/articles/sensor/2006_4_28.php) ] – 26.01.2018 г. – Загл. с экрана.

26. Безвесільна О. М. Прецизійний приладовий навігаційний комплекс та його чутливі елементи. Монографія / Безвесільна О.М. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2019. – 451 с.

27. Веселов, К. Е. Гравиметрическая разведка / К. Е. Веселов. – М.: Недра, 1968.– 512 с.

28. Безвесільна, О. М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: монографія / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. –

Житомир:

ЖДТУ, 2013. – 240 с.

29. Годовицын И.В. Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра / И.В. Годовицын, Д.А. Сайкин, Р.А. Федоров, В.В. Амеличев // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППИМ РАН, 2010. С. 642-647.

30. Самотокін, Б. Б. Лекції з теорії автоматичного керування / Б. Б. Самотокін. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 508 с.

31. Засоби вимірювання екологічних параметрів: підручник / Безвесільна О.М., Войницький А. П., Єльнікова Т. О. та ін. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – 508с.

32. Іващенко, О. А. Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача: магістерська дис.: 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Іващенко Олена Андріївна. - Київ, 2018. - 127 с.

33. Mohinder, S. Grewal Global positioning systems, inertial navigation, and integration /Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews – Hoboken, New Jersey : Wiley-interscience a John Wiley& Sons Inc., 2007. – 525 p

34. Козюков, Д. Д. Дослідження ємнісного МЕМС чутливого елемента стабілізації : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Козюков Денис Сергійович. – Київ, 2019. – 92 с.

35. Безвесільна О. М. Автоматизована гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння на базі МЕМС-гравіметра / О.М. Безвесільна, А.О. Просюк // Тези I Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення». – 2015. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/358> (Дата звернення 01.11.2021)

36. Безвесільна О. М. Апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження ємнісного гравіметра [Текст] / О. М. Безвесільна, К. С. Козько // Вісник інженерної академії України. – 2013. – №2. – с.15-17

37. Тювин А.В. Особенности использования функционально-избыточных блоков акселе-рометров в бесплатформенных навигационногравиметрических комплексах/ Тювин А.В., Афонин А.А., Сулаков А.С.// Труды МАИ. Выпуск № 91, – 2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://trudymai.ru/upload/iblock/60d/tyuvin\\_afonin\\_sulakov\\_rus.pdf?lang=ru&issue=91](http://trudymai.ru/upload/iblock/60d/tyuvin_afonin_sulakov_rus.pdf?lang=ru&issue=91)

38. Бусыгин Б.С. Специализированная геоинформационная система Рапид: структура, технологии, задачи / Бусыгин Б.С., Никулин С.Л.// Геоінформація – 2016 – №1 – с.22-36 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.karbon-service.com.ua/wp-content/uploads/2015/01/2-1-2016.pdf>

39. Балк П.И. Обратные задачи гравиразведки как проблема принятия решения в условиях неопределенности и риска / П. И. Балк, А. С. Долгаль // Физика Земли – 2017 – №2 – с.45-61 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/personalnye-stranitsy-prepodavatelej/dogal/FZE0045.pdf>

40. Johanna Torppa. Unsupervised clustering and empirical fuzzy memberships for mineral prospectivity modelling/ Johanna Torppa, Vesa Nykänen, Ferenc Molnár // Ore Geology Reviews – 2019 – №107 – с.58-71 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136818305195>

41. Нічик В.С. Автоматизована гравіметрична система з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин / Черепанська І. Ю., Безвесільна О. М., Нічик В. С., Котляр С. С., Нечай С. О. // Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки», – 2021 – №6 – с.195-200.

42. 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.

43. Безвесільна О.М. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр / Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Вісник Хмельницького національного

університету. Серія: Технічні науки, №3, 2020, С. 124-127. (Фахове видання)  
DOI 10.31891/2307-5732.

44. Безвесільна О.М. Моделювання впливу параметрів збурень на роботу двоканального п'єзоелектричного гравіметра / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – № 1 (154). – С. 21-28. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-21-28>

45. Антонюк В.С. Методологія наукових досліджень: навч. посіб./ В.С.Антонюк, Л.Г. Полонський, В.І. Аверченков, Ю.А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.

46. Організація науково-інноваційної діяльності: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня доктора філософії за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. О. Подолян, В. С. Антонюк, М. В. Філіппова. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,29 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 105 с. – Назва з екрана.  
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45646>  
[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45646/1/ONID\\_2021.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45646/1/ONID_2021.pdf)

47. Методологія наукових досліджень у галузі: практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад.: Н.І. Бурау, В.С. Антонюк, Д.О. Півторак. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,4 Мбайт). – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 58 с.  
[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45871/1/Metod\\_doslid.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45871/1/Metod_doslid.pdf)

48. Безвесільна О.М. Автоматизований двоканальний п'єзоелектричний гравіметр АГС / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко, А.Г. Ткачук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – №2. – С. 17-22. (Фахове видання). DOI 10.31891/2307-5732.