

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

«На правах рукопису»
УДК 621 317

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

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

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

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

**на тему: «Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої
системи керування БПЛА»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПМ-21мп
Назаренко Андрій Олегович

Науковий керівник:

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

Консультант з розробки стартап-проєкту:

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

Рецензент:

доц, к. т. н., доцент кафедри ІВТ
Синиця Валентин Іванович

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

Студент Назаренко А. О.

Київ - 2024 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-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____Юрій КИРИЧУК
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Назаренко Андрію Олеговичу

1. Тема дисертації «Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої системи керування БПЛА», науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від « 08 » листопада 2023 р. № 5188-с
2. Термін подання студентом дисертації 20.12.2023
3. Об'єкт дослідження є трикоординатний п'єзоелектричний чутливий елемент (ЧЕ), який забезпечує вимірювання повного вектору прискорення сили тяжіння та його модуля для системи автоматизованого керування БПЛА
4. Вихідні дані MPU6050 та Raspberry Pi для написання програми, використання ГМК-1 для дослідження ТПГ
5. Перелік завдань, які потрібно розробити Загальний огляд систем автоматизованого керування БпЛА. Аналітичний огляд засобів вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ). Принцип дії, побудова, застосування, математична модель ЧЕ автоматизованої системи керування БпЛА. Аналіз похибок ЧЕ, підвищення точності ЧЕ. Розрахунки параметрів та. експериментальні лабораторні дослідження ЧЕ. Дослідженні на ЕОМ ЧЕ. Програмна реалізація взаємодії ЧЕ і мікроконтролера (використати MPU6050 та RP PiCo). Розробка стартап-проєкту.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу формат А1 - Функціональна схема автоматизованої системи із ТПГ 1 арк., формат А1 - Принципова схема ТПГ 1 арк., формат А1 – Класифікація БПЛА 1 арк., формат А1 - Принципова схема установки для експериментальних досліджень ТПГ 1 арк., формат А1 – Блок-схема автоматизованої системи керування (СІН) БПЛА 1 арк., формат А1 – Графіки з досліджень ТПГ 1 арк.
7. Перелік публікацій: Безвесільна О.М., Назаренко А.О. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої гравіметричної системи. Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці: тези доповідей учасників Всеукраїнської науково-практичної

онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (15-19 травня). Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С.110; Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Нечай С.О., Назаренко А.О. Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої системи керування. Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці: тези доповідей учасників Всеукраїнської науково-практичної онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (15-19 травня) Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С.111-112.

8. Консультанти розділів дисертації*

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

9. Дата видачі завдання 28 вересня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури за темою	28.09.2023	
2	Огляд та розробка принципової схеми	20.10.2023	
3	Огляд та розробка структурної схеми	30.10.2023	
4	Опис математичної моделі пристрою	05.11.2023	
5	Виконання експериментальних та розрахункових досліджень	10.11.2023	
6	Розділ №5 Розробка стартап-проекту. "безпілотний літальний апарат SKYFANTOM"	26.11.2023	
7	Оформлення текстової та графічної частини	25.12.2023	
8	Передача матеріалів МД на перевірку науковому керівнику	08.01.2024	
9	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості	09.01.2024	
10	Представити МД на рецензію	10.01.2024	
11	Розробка презентації та узгодження її з керівником МД	11.01.2024	
12	Подання оригіналів документів до захисту	11.01.2024	
13	Представити МД на затвердження зав. кафедри	11.01.2024	
14	Представити МД до екзаменаційної комісії	16.01.2024	

Студент

Андрій НАЗАРЕНКО

Науковий керівник

Олена БЕЗВЕСІЛЬНА

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

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків до усієї виконаної роботи та списку використаної літератури. Дисертація містить 90 сторінок основного тексту, 19 ілюстрацій, 28 таблиць та 21 посилань. Загальний обсяг магістерської дисертації склав 105 сторінок.

Мета і задачі роботи. Метою дисертації є дослідження нового трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої системи керування БпЛА. Основні задачі дисертації:

- вступ (актуальність, галузь використання, новизна, практична цінність);
- загальний огляд систем автоматизованого керування БпЛА;
- аналітичний огляд засобів вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ);
- принцип дії, побудова, застосування, математична модель ЧЕ автоматизованої системи керування БпЛА;
- аналіз похибок ЧЕ, питання підвищення точності вимірювання ПСТ;
- розрахунки основних параметрів ЧЕ;
- експериментальні лабораторні дослідження ЧЕ;
- дослідженні на ЕОМ ЧЕ;
- програмна реалізація взаємодії ЧЕ і мікроконтролера (використати MPU6050 та Raspberry Pi Pico);
- розробка стартап-проєкту;
- висновки.

Об'єктом дослідження є процес визначення прискорення сили тяжіння трикоординатним п'єзоелектричним гравіметром автоматизованої системи керування БпЛА.

Предметом дослідження є трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр у складі автоматизованої системи керування БпЛА.

Методи дослідження: методи, які покладено в основу цієї роботи базуються на принципах п'єзоефекту - виникнення електричного заряду у

пластині зі спеціального матеріалу, що деформується у результаті впливу сили, включно з прискоренням сили тяжіння.

Практичне значення результатів:

- описано принцип роботи трикоординатного п'єзогравіметра та його принципову схему;

- описано математичні та фізичні основи його роботи, розглянуто отримання та обробку вихідного сигналу;

- розглянуто питання підвищення точності вимірювання.

Публікації. Оpubліковано дві тези до конференції «Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої системи керування» та «Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої гравіметричної системи».

Ключові слова: чутливий елемент, прискорення сили тяжіння, автоматизована система керування БПЛА, трикоординатний п'єзогравіметр, чутливий елемент.

ABSTRACT

The master's thesis comprises an introduction, five chapters, conclusions summarizing the entire study, and a bibliography. The thesis encompasses 90 pages of the main text, 19 illustrations, 28 tables, and 21 references, resulting in a total volume of 105 pages.

Objective and tasks of the work: The aim of the dissertation is to investigate a new three-coordinate piezoelectric gravimeter within the automated UAV control system. The main tasks of the dissertation include:

- introduction (relevance, field of application, novelty, practical value).
- general overview of automated UAV control systems.
- analytical review of gravity acceleration measurement tools.
- principle of operation, construction, application, mathematical model of the sensitive element of the automated UAV control system.
- analysis of sensitive element errors, issues related to increasing the accuracy of determining gravity acceleration measurement.
- calculations of the main parameters of the sensitive element.
- experimental laboratory studies of the sensitive element.
- computer-aided design (CAD) of the sensitive element.
- program implementation of the interaction between the sensitive element and the microcontroller (using MPU6050 and Raspberry Pi Pico).
- development of a startup project.
- conclusions.

The object of the research is the process of determining gravity acceleration using a three-coordinate piezoelectric gravimeter within the automated UAV control system.

The subject of the research is the three-coordinate piezoelectric gravimeter as part of the automated UAV control system.

Research methods: The methods underlying this work are based on the principles of the piezoelectric effect – the generation of an electric charge in a plate

made of a special material that deforms under the influence of force, including gravity acceleration.

Practical significance of the results:

- description of the operating principle of the three-coordinate piezogravimeter and its schematic diagram;

- description of the mathematical and physical foundations of its operation, including the reception and processing of the output signal;

- consideration of strategies to improve measurement accuracy.

Publications: Two theses were published for the conference "Three-coordinate Sensitive Element of the Automated Control System" and "Two-channel Piezoelectric Gravimeter of the Automated Gravimetric System."

Keywords: sensitive element, gravity acceleration measurement, automated UAV control system, three-coordinate piezogravimeter, sensitive element.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	14
1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ.....	16
1.1. Поняття систем автоматизованого керування.....	16
1.2. Огляд базового функціоналу автоматизованої системи керування БПЛА.....	18
1.3. Загальний опис класифікації безпілотних літальних апаратів.....	19
1.4. Опис принципу автономності БПЛА.....	21
1.5. Використання чутливих елементів в АСКБПЛА.....	23
1.6. Формулювання мети роботи, постановка завдань та визначення актуальності обраної теми дослідження.....	25
1.7. Висновки до розділу 1.....	26
2. ТРИКООРДИНАТНИЙ ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПСТ. ОПИС ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТРИКООРДИНАТНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВИМЕТРА.....	27
2.1. Трикоординатний чутливий елемент.....	27
2.2. Різновиди гравіметрів, їх функціональність та принципи роботи.....	29
2.3. Огляд існуючих рішень у сфері вимірювання ПСТ.....	30
2.3.1. Розгляд та аналіз гіроскопічного гравіметра.....	31
2.3.2. Розгляд струнного гравіметра.....	34

2.3.3. Розгляд балістичного лазерного гравіметра з двовимірним відеозображенням.....	35
2.3.4. Розгляд та аналіз використання п'єзоелектричного гравіметра. Переваги на недоліки застосування.....	37
2.4. Трикоординатний гравіметр. Опис особливостей та функціональності.....	39
2.5. Висновки до розділу 2.....	40
3. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРИКОРДИНАТНИЙ ГРАВИМЕТР. ПРИНЦИП РОБОТИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ.....	42
3.1. Модель та принцип роботи п'єзоелектричного гравіметра. Використання явища п'єзоєфекту для виконання вимірювання.....	42
3.2. Розгляд та аналіз трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра. Принцип роботи.....	45
3.3. Підвищення точності вимірювання.....	48
3.4. Висновки до розділу 3.....	53
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОБОТА З ТРИКОРДИНАТНИМИ ЧУТЛВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	54
4.1. Програмування та робота з трикоординатними чутливими елементами на рівні програмного забезпечення. Автоматизація процесів вимірювання.....	54
4.2. Особливості організації проведення гравіметричних вимірювань. Експериментальні дослідження ТПГ.....	59
4.3. Особливості руху АГС на базі п'єзоелектричного гравіметра. Визначення аномалій.....	63
4.4. Експериментальні дослідження характеристик п'єзоелектричного гравіметра.....	65

4.5. Метрологічні характеристики п'єзоелектричного гравіметра в автоматизованій системі.....	70
4.6. Висновки до розділу 4.....	71
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ SKYFANTOM».....	72
5.1. Опис ідеї проекту.....	73
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	76
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	79
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	90
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	93
5.6. Висновки до розділу 5.....	100
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	103
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ARM (Advanced RISC Machine) - архітектура мікропроцесорів, яка визначає набір інструкцій та організацію обчислювальних блоків;

GPS - Global Positioning System (глобальна система позиціонування);

АСК - автоматизована система керування;

АСКБпЛА - автоматизована система керування безпілотним літальним апаратом;

АГС - авіаційна гравіметрична система;

БпЛА - безпілотний літальний апарат;

БпАК - безпілотний авіаційний комплекс;

БЦОМ - бортова цифрова обчислювальна машина;

БЛГ - Балістичний лазерний гравіметр;

БАКСВ - бортовий апарат комплексу сейсмічних вимірювань;

ВП - вимірювальний перетворювач;

ГМК - генератор механічних коливань;

ЕОМ - електронна обчислювальна машина;

ЕРС - електрорушійна сила;

ІМ - інерційна маса;

ІНС - інерціальна навігаційна система;

ІП - індукційний перетворювач;

Кл - Кулон, одиниця вимірювання величини електричного заряду;

кГц - кілогерц, одиниця вимірювання частоти;

мГал - мілігал, одиниця виміру прискорення у системі одиниць СГС, де 1 Гал = 1 см/с²;

Н - Ньютон, одиниця вимірювання сили у системі СІ;

ОП - операційний підсилювач;

ПСТ - прискорення сили тяжіння;

ПЕ - п'єзоелектричного елемента;

РО - рухомий об'єкт;

рад/с - одиниця вимірювання кутової швидкості у системі СІ;

СГС - метрична система одиниць вимірювання, одиницями якої є сантиметр, грам, секунда;

СГ - струнний гравіметр;

ТП - трикоординатний п'єзогравіметр;

ЧЕ - чутливий елемент;

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати набули високої популярності у широкому спектрі задач, починаючи від звичайних задач відео- та фото- зйомки, наукових досліджень та закінчуючи великою кількістю задач військового, розвідувального, та рятувально-пошукового характеру.

Такі апарати отримали велику кількість різновидів, у залежності від цільового призначення, від простих малогабаритних квадро-коптерів і закінчуючи великими літако-подібними повноцінними комплексами з величезним набором сенсорних та вимірювальних систем, систем керування та навіть штучного інтелекту і централізованим пунктом управління та навіть здатністю працювати у парі з іншими безпілотними апаратами та обмінюватися даними між собою.

Один із різновидів БПЛА є системи з автоматизованим принципом керування, який відрізняється від стандартних з ручним управлінням засобів тим, що вимагає високого рівня організації апаратної та програмної складової, що надає змогу здійснювати безпечний автономний політ без прямого втручання оператора комплексу.

Такі системи мають підвищений рівень складності. Це пов'язано з низкою вимог до такого роду апаратів:

- якісний алгоритм дій та система прийняття рішень, яка забезпечить оптимальний режим роботи і результат;
- вимоги до рівня захисту, як фізичного так і каналів зв'язку;
- вимоги до точності і кількості вимірювальних систем;
- наявність високоточних систем орієнтації та навігації;
- оптимальна система енергоспоживання та її управління, тощо.

Тематика дисертації спрямована саме на визначенні вимірюваних засобів для забезпечення відповідного рівня точності, що матиме значний вплив на роботу БПЛА.

Використання комплексів безпілотних літальних апаратів з автоматизованою системою керування обумовлено зниженням впливу оператора на процес керування таким чином, що система здатна самостійно, на основі вимірюваних даних, приймати рішення, або здійснювати керування апаратом, його режимом роботи тощо. Тому зменшується необхідність постійного моніторингу даних з сенсорів БПЛА і здійснення постійних коректувань, зростає надійність системи.

Такий принцип також має значення при роботі на великих дистанціях, де відсутня можливість впливати на роботу апарату в режимі реального часу, а реакція на навколишнє середовище або загрози є критично важливим.

1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

1.1. Поняття систем автоматизованого керування

Автоматизована система керування (АСК) є комплексом програмних та апаратних засобів, які у загальній сукупності призначені для оптимізації керування певним процесом, пристроєм або системою. Такі системи призначені для зниження рівня впливу людського фактору та загалом виконання дій людиною, підвищення ефективності, у певних моментах точності та надійності у виконанні процесів, обробки інформації та її аналізу, керуванні системою та інших.

Автоматизовані системи будуються на основі великої кількості сенсорів, виконавчих механізмів, перетворювачів які працюють на базі мікроконтролерів або мікрокомп'ютерів, вибір яких залежить від складності і призначення системи, і програмується на виконання певних задач або режимів роботи в залежності від цільового призначення.

Якщо розглядати автоматизовану систему керування безпілотним літальним апаратом (АСКБпЛА) то передбачається що це спеціалізований комплекс апаратних і програмних засобів, який може утворювати загальну систему керування яка, в залежності від специфіки, може містити примітивний чи складний автопілот, системи моніторингу та аналізу, автоматизовані системи навігації, наприклад на основі GPS-модулів, автоматизовану систему управлінням енергозабезпеченням, які працюють на основі програми і може приймати рішення щодо найоптимальнішого режиму роботи. Такі системи мають здатність визначати своє місце знаходження, орієнтацію у просторі, корегувати напрямок та підтримувати його, виконувати дії в автономному режимі тощо.

Такого роду системи безпілотних літальних апаратів можуть мати різні цільові призначення. Основними галузями їх використання на даний момент є

дослідження навколишнього середовища, поверхні землі, рятувальні місії, а також у військових цілях, де вони мають цілу низку різновидів за застосуванням і розвідці. Їх застосування виправдане спрощенням цілої низки процесів, економії часу та ресурсів.

Використання автоматизованого управління, реалізує субоптимальний контроль за траєкторією польоту як одного БПЛА, так і групи слідкуючих об'єктів. Методика побудови автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА базується на модельно-орієнтованому проектуванні. Для забезпечення польоту БПЛА в умовах перешкод є можливість здійснювати формування характеристик стабільності та керованості на всіх рівнях маневрування [1].

Якість управління польотом БПЛА визначається помилками усталеного польоту за відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод. На рис. 1 показано блок-схему автоматизованої системи керування БПЛА.

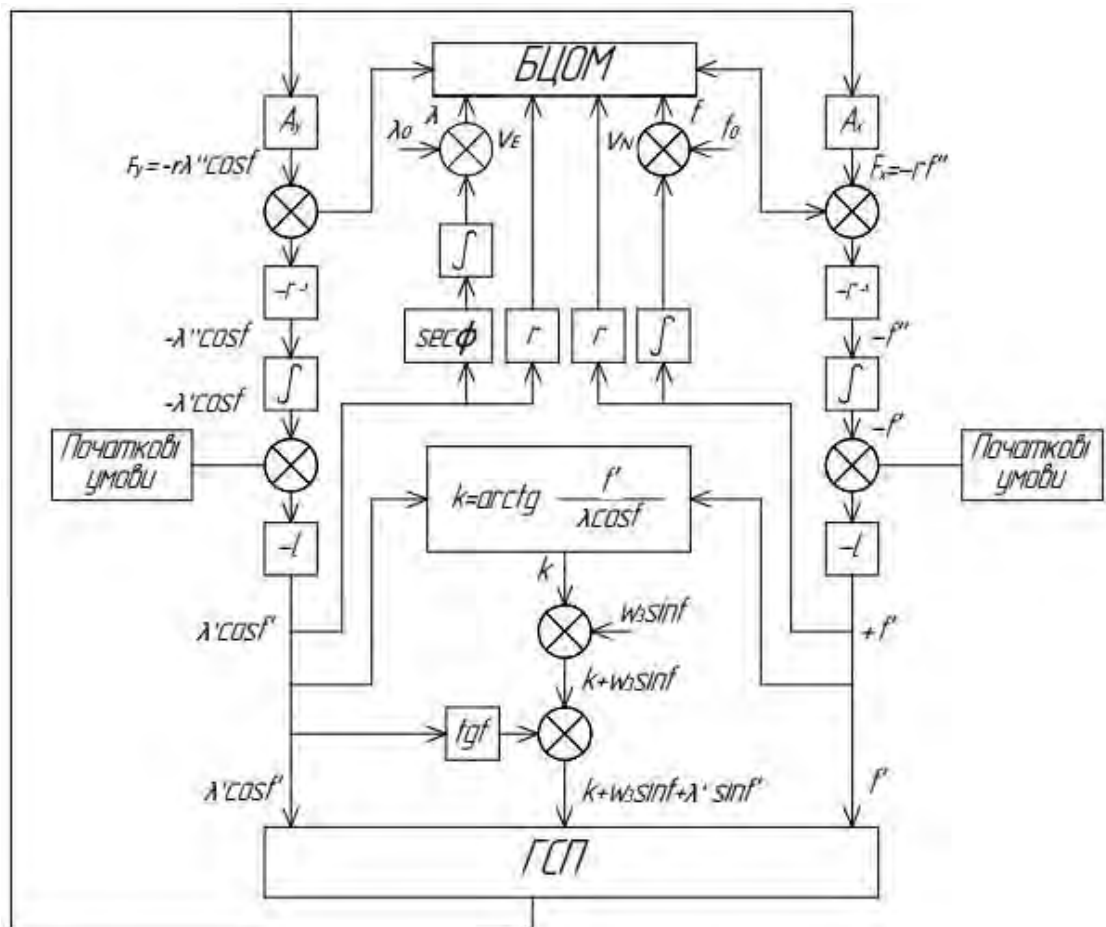


Рисунок 1.1. Блок-схема автоматизованої системи керування БПЛА

Згідно з розглянутої схеми автоматизованої системи керування та опису [15] можна сказати, що на гіростабілізованій платформі (ГСП) встановлено чутливі елементи систему ІН. Відповідно, виміряні вихідні сигнали акселерометрів є значеннями кутових швидкостей відносно східної та північної осей, що визначається у результаті врахування початкових умов та зміни знаку, а також ділення r^{-1} та інтегрування.

Значення λ (довгота) отримується у результаті множення ω_y на $\sec\phi$ та після інтегрування. Значення ϕ визначається у результаті інтегрування ω_x . Відповідно північні та східні складові швидкості БпЛА визначається, як добутки ω_y та ω_x на r .

1.2. Огляд базового функціоналу автоматизованої системи керування БпЛА

Розглядаючи автоматизовані системи керування БпЛА варто звернути увагу на базовий функціонал, який включає у собі більшість рішень. До цього переліку входить:

1) система орієнтації та навігації - ця функція передбачає наявність спеціальних модулів які призначені для визначення цих параметрів, для орієнтації у просторі використовуються акселерометри та гіроскопи, а для визначення місця знаходження модулі супутникової навігації;

2) автономність роботи - передбачає здатність такого роду системи виконувати та приймати рішення, або перемикати режими роботи, без прямого втручання оператора;

3) автоматизоване керування траєкторією польоту - передбачає можливість БпЛА прямувати за заданою траєкторією з можливістю автоматичного корегування напрямку у залежності від різного роду факторів;

4) системи комунікації - наявність систем, які надають змогу отримувати та передавати дані в режимі реального часу;

5) автоматизований збір та обробка інформації - передбачає наявність переліку сенсорів, які виконують вимірювання різного роду параметрів, таких як температура всередині системи та навколишнього середовища, визначення атмосферного тиску і рівня висоти над поверхнею тощо;

б) автоматизоване керування енергозабезпеченням - передбачає моніторинг енергоспоживання системою та її складовими, визначення найоптимальнішого режиму роботи та автоматичний перехід до такого режиму;

Цей перелік не є повним та може бути розширеним та уточненим у залежності від призначення системи.

1.3. Загальний опис класифікації безпілотних літальних апаратів

Розглядаючи поняття АСКБПЛА варто розглянути та описати їх загальну класифікацію для поглибленого розуміння сфери їх застосування і особливостей за призначенням.

Для полегшення опису класифікації дані будуть представлені у вигляді таблиці, яка складена на основі даних з нормативного документу про затвердження правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України [2].

Таблиця 1.1. Зведена класифікація БПЛА за основними ознаками [2]

Клас	Рівень застосування	Бойовий радіус	Категорія БПЛА БпАК держав - членів НАТО
І клас <150 кг	Мікро (тактичні) злітна маса < 2 кг	до 5 км (зона прямої видимості)	Micro
	Міні (тактичні поля бою) 2 кг ≤ злітна маса ≤ 15 кг	більше 5 км (зона прямої видимості)	Mini
	Малі (тактичні) злітна маса > 15 кг	більше 25 км (зона прямої видимості)	Small

Продовження таблиці 1.1. Зведена класифікація БпЛА за основними ознаками [2]

II клас 150- 600кг	Тактичні (оперативно-тактичні)	більше 50 км (зона прямої видимості)	Tactical
III клас >600кг	Оперативні	більше 200 км (поза зоною прямої видимості)	MALE
	Стратегічні	більше 200 км (поза зоною прямої видимості)	HALE

У розділі буде розглянуто лише частину із можливих класифікацій безпілотних літальних апаратів та комплексів, на які у даному випадку варто звернути увагу.

За типом літального апарата класифікують наступні:

- літаковий тип;
- вертолітний тип;
- мультироторний;

За призначенням БпЛА БпАК класифікуються як [2]:

1) бойові БпЛА БпАК - призначені для виконання бойових завдань, до яких належать [2]:

- розвідувальні БпЛА БпАК;
- БпЛА БпАК розвідки та цілевказання;
- БпЛА БпАК радіоелектронної боротьби;
- ударні БпЛА; БпЛА - перехоплювачі. Бойові БпЛА БпАК можуть мати

комбіноване призначення;

2) спеціальні БпЛА БпАК - призначені для виконання спеціальних завдань як ретранслятори та мішені, а також для спостереження та моніторингу об'єктів, території тощо [2].

Також класифікують за типом системи керування польотом [2]:

1) автономні БпЛА БпАК, що здійснюють політ за попередньо введеною програмою та можуть мати аварійний режим приведення БпЛА в точку посадки або режим аварійного припинення польоту [2];

2) пілотовані БпЛА БпАК, до яких належать [2]:

- БпЛА БпАК з ручним пілотуванням;
- БпЛА БпАК, що пілотуються автопілотом;
- БпЛА БпАК, що пілотуються за допомогою точок шляху;
- БпЛА БпАК з комбінованою системою керування

Також варто звернути увагу на класифікацію засобів за кількістю разів використання, тому їх можна умовно розподілити на одноразового використання та багаторазового. Ця класифікація має пряме відношення до використаних комплектуючих та їх вартості, особливостей технологічних і функціональних можливостей, складності архітектури тощо.

Безпілотні літальні апарати розрізняються за низкою параметрів, включаючи габаритні розміри апарату, цільове призначення, технологічні характеристики, сфери застосування тощо.

Кожен з цих різновидів відповідно має свої переваги та обмеження, які визначені своїм напрямком застосування, наприклад за цивільним та військовим застосуванням.

1.4. Опис принципу автономності БпЛА

Для того, щоб зрозуміти сутність автоматизованого керування такими системами варто розглянути і описати поняття принципу автономності безпілотних літальних апаратів виділивши основні параметри.

У загальному розумінні принцип автономності передбачає можливість БпЛА самостійно приймати відповідні рішення до ситуації яка виникає у процесі польоту, або роботи складових систем загалом. Передбачається наявність різних режимів роботи, наприклад стандартний режим роботи та аварійний, режим низького енергоспоживання, ручний режим тощо.

Сучасні автономні системи можуть будуватися на основі технологій машинного навчання, включаючи розділи штучного інтелекту, а також на основі алгоритмів керування, цей підхід залежить від вище розглянутих класифікацій апаратів. У будь-якому випадку ці системи містять перелік апаратних модулів - сенсорів, з яких отримуються раніше описані дані та параметри, на які посилається система керування при прийнятті рішення.

Варто визначити узагальнений перелік складових забезпечення автономності роботи БПЛА:

1) наявність сенсорів та вимірювальних систем - для забезпечення автономного режиму роботи система обов'язково повинна бути оснащеною низкою сенсорів, відповідно до вимог і цільового призначення апарату, які надають змогу визначати важливі параметри з навколишнього середовища та за необхідності запам'ятовувати їх і передавати, визначати орієнтацію в просторі, місце знаходження тощо;

2) обробка та аналіз даних - система повинна мати визначений принцип керування, який матиме змогу обробляти отримані дані з сенсорів та перемикає режими роботи за необхідністю, тобто реагувати на зміни у навколишньому середовищі;

3) система керування рухом - апарат оснащений усіма необхідними технічними засобами які надають змогу виконувати безпосереднє керування траєкторією польоту, здатність оптимізувати шлях або здійснювати корегування та підтримку заданого маршруту з певною точністю, швидкістю, виконувати зліт та посадку тощо;

4) здатність автономної системи запам'ятовувати виконані дії, та здійснювати їх корегування;

5) окремим пунктом можна визначити здатність до планування та прийняття рішень на основі оброблених даних з сенсорів і пошук оптимального вирішення поставленої задачі з урахуванням поточної ситуації. Цей пункт скоріше відноситься до систем на основі певного рівня штучного інтелекту, який навчений на основі великої кількості даних, і здатний визначати оптимальне

рішення. Також такі системи можуть включати планування маршруту, розумне управління енергоспоживанням тощо.

Принцип автономності стабільно розвивається відповідно до поточного стану розвитку науки та можливостей штучного інтелекту і апаратних складових.

Щоб зробити БпЛА повністю автономним, все ще потрібно багато технологічних та алгоритмічних розробок. Наприклад, для систем БпЛА потрібно покращення зондування перешкод та подальше їх уникнення. Це стає особливо важливим, оскільки автономні БпЛА починають працювати в цивільному повітряному просторі, який використовується іншими літаками [3].

Управління безпілотними літальними апаратами корисно, але це може бути складно під час взаємодії транспортного засобу з навколишнім середовищем [4].

Ця взаємодія може бути, наприклад, у формі посадки на землю або на посадочний майданчик, стикування зі станцією, наближення до місцевості для огляду або наближення до іншого літака. Такі завдання часто можна вирішити при дистанційному пілотуванні транспортного засобу, особливо коли пілот має зображення навколишнього оточення від першої особи. Однак ручний контроль людиною не завжди може бути застосований, наприклад, через відсутність відповідного каналу передачі даних, або через точність та/або швидкість, яка потрібна для маневру, яка може бути поза можливостями людини. Таким чином, важливо знайти ефективні та гнучкі стратегії, що дозволяють таким засобам виконувати цей перелік завдань в автономному режимі [3].

1.5. Використання чутливих елементів в АСКБпЛА

Головними джерелами вихідної інформації є математична модель динаміки БпЛА, виконуючі пристрої, сенсори, датчики, функції систем орієнтації та кінцева точка шляху. На основі згаданих параметрів та обмежуючих

факторів автоматизована система управління повітряним рухом БпЛА повинна сформувавши траєкторію шляху [1].

Чутливі елементи (ЧЕ) становлять одну з основних складових автоматизованої системи керування, особливо у системах керування БпЛА.

Чутливий елемент представляє собою один зі складових датчика, у залежності від призначення це може бути спеціальна мембрана, гіроскоп, пластина тощо, який призначений для безпосереднього сприйняття певної фізичної величини або параметра.

Загалом система датчика на основі ЧЕ здатна сприймати фізичний параметр, перетворювати ці дані зазвичай в електричний сигнал і передавати його до центрального ядра, наприклад міні-комп'ютера, контролера або мікроконтролера в залежності від типу системи для подальшої обробки і виконання певних дій.

Такі чутливі елементи в системі автоматизованого керування БпЛА призначені для виконання наступних дій:

1) орієнтація, навігація та позиціонування - використовуються гіроскопи, акселерометри задля забезпечення можливості реагувати на зміни положення та орієнтації що надає змогу визначати та керувати рухом БпЛА. Такі ЧЕ забезпечують підтримку стабільності польоту та реакцію на зміни у навколишньому середовищі;

2) вимірювання відстаней до поверхонь - використовуються далекоміри, вони можуть бути лазерними або ультразвуковими, для забезпечення функціоналу визначення відстаней до поверхонь при зльотах та посадках, а також задля уникнення перешкод, якщо такі виникатимуть;

3) визначення параметрів атмосферного середовища - використовуються спеціальні сенсори на базі ЧЕ які здатні реагувати та визначати такі показники як: температура, вологість, атмосферний тиск, силу вітру тощо. Вимірювання цих показників є дуже важливим для забезпечення автоматизованого або автономного керування БпЛА.

Але варто враховувати і те, що у деяких випадках також виникає необхідність вимірювати певний перелік параметрів, таких як температура та тиск, в середині самого літального апарату, задля уникнення пошкоджень системи та в подальшому втрати системи.

1.6. Формулювання мети роботи, постановка завдань та визначення актуальності обраної теми дослідження

Метою роботи є проведення дослідження використання, та пошук шляхів розвитку і вдосконалення трикоординатних чутливих елементів гравіметра, у даному випадку п'єзоелектричного. Це дослідження виконується з огляду на вдосконалення автоматизованих систем керування безпілотних літальних апаратів.

Вимоги до точності та стабільності роботи безпілотних авіаційних комплексів та апаратів зростає в міру розвитку та викликів сучасності. За їх точність і стабільність відповідають відповідні чутливі елементи, які виконують базові вимірювальні функції. Відповідно цими аспектами виправдовується актуальність обраної тематики.

Основні задачі дисертації:

- вступ (актуальність, галузь використання, новизна, практична цінність);
- загальний огляд систем автоматизованого керування БпЛА;
- аналітичний огляд засобів вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ);
- принцип дії, побудова, застосування, математична модель ЧЕ автоматизованої системи керування БпЛА;
- аналіз похибок ЧЕ, питання підвищення точності вимірювання ПСТ;
- розрахунки основних параметрів ЧЕ;
- експериментальні лабораторні дослідження ЧЕ;
- дослідженні на ЕОМ ЧЕ;

- програмна реалізація взаємодії ЧЕ і мікроконтролера (використати MPU6050 та Raspberry Pi Pico);
- розробка стартап-проєкту;
- висновки.

1.7. Висновки до розділу 1

У цьому розділі 1 було розглянуто та описано загальні принципи та основні положення щодо поняття автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом.

Розглянуто базові принципи, особливості класифікації БпЛА та їх відмінності за різним призначенням, додано таблицю з узагальненою класифікацією, розглянуто притаманний майже кожній такій системі базовий функціонал та принцип автономності.

Кожна з розглянутих тем послідовно доповнює одна одну, визначаючи особливості, можливості, вимоги та принципи для досягнення автоматизованого керування безпілотним літальним апаратом.

Вагоме значення у системах автоматизованого керування відіграють чутливі елементи, датчики та сенсори, які реагують на зміни навколишнього середовища, визначають зміну положення, швидкість, прискорення, зміни в гравітаційному чи магнітному полі та інші важливі параметри. У даній роботі досліджуються новітні чутливі елементи, впровадження яких забезпечує автоматизоване керування БпЛА, у даному випадку це трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр.

Рішення на основі нових ЧЕ забезпечать покращення функціональних можливостей та точності в галузі автоматизованих систем, зокрема для керування БпЛА.

2. ТРИКООРДИНАТНИЙ ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПСТ. ОПИС ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТРИКООРДИНАТНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВИМЕТРА

2.1. Трикоординатний чутливий елемент

Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої системи керування БПЛА - це спеціальний електронний або механічний пристрій, що використовується для проведення вимірювань зміни параметрів, зазвичай це зміна швидкості, прискорення, пересування в просторі тощо, у трьох координатних площинах.

Застосування таких елементів поширене у великій кількості приладів, які застосовуються у наступних сферах:

- авіаційні та космічні системи орієнтації та навігації;
- медичні прилади;
- робототехніка та автоматизація;
- автомобільна промисловість та інші.

Зазвичай трикоординатні чутливі елементи застосовують в приладах де необхідно вимірювати зміни параметрів руху, положення та орієнтації об'єктів у тривимірному просторі. На основі цієї інформації здійснюється подальше керування об'єктом в залежності від його призначення, наприклад для точного позиціонування в робототехніці, або для визначення позиції БПЛА і корегування напрямку його руху тощо.

До трикоординатних пристроїв входять різні датчики, які мають можливість виконувати вимірювання у трьох взаємоперпендикулярних координатних площинах, наприклад:

1) гіроскопи - такі пристрої здатні вимірювати кутову швидкість об'єкта у трьох площинах, наприклад один із поширених гіроскопів-акселерометрів в сфері робототехніки який здатний виконувати таке вимірювання це MPU6050;

2) акселерометри - ці пристрої призначені для вимірювання прискорення об'єкта, до поширених трикоординатних акселерометрів в сфері робототехніки та автоматизації можна віднести ADXL345, MMA8452Q, MMA8451 тощо;

3) цифрові компаси - це пристрої, які здатні вимірювати магнітне поле, а деякі з них мають здатність виконувати ці вимірювання в трьох осях, до таких пристроїв можна віднести QMC5883L, HMC5983 та інші;

4) гравіметри - ці прилади призначені для вимірювання прискорення сили тяжіння, та можуть використовуватися для вимірювання гравітаційного поля Землі в різних точках. Гравіметри можуть бути одно-, дво- та трикоординатними.

У цьому списку показано лише декілька пристроїв які використовуються в системах керування БпЛА.

Точність чутливих елементів, зокрема і у гравіметрах, може залежати від низки факторів, до яких можна віднести наступні:

1) використані матеріали - дуже важливо приділяти увагу матеріалам з яких виготовлений чутливий елемент, так як це у різних умовах роботи може впливати на деформацію ЧЕ, що у свою чергу може призвести до спотворень результатів вимірювання або безповоротної деформації самого ЧЕ;

2) залежність стабільності роботи від температури - різні значення температури, або її перепад, в залежності від матеріалу з якого виготовлений ЧЕ може спричиняти зміни, наприклад довжини елемента, що спричинятиме помилку при вимірюваннях. Тому цей параметр варто враховувати і проектувати системи так, щоб температура мала мінімальний вплив на роботу системи або взагалі була усунута;

3) вплив вібрацій та коливань - точність і працездатність майже кожного пристрою залежить від впливу вібрацій та коливань, але найбільше це може бути помітним у системах які вимагають високої точності вимірювання. Тому при проектуванні систем на базі чутливих елементів варто враховувати цей фактор та забезпечувати усунення або мінімізацію даного негативного впливу;

4) вплив шумів - у різних робочих середовищах можуть виникати різного роду шуми, наприклад від електромагнітного впливу, тому варто впроваджувати

системи фільтрації, що забезпечать захист та мінімізацію впливу шумів на результат вимірювання;

5) калібрування та корекція - точність роботи також залежить від цього параметру, так як завдяки калібруванню та корекції здійснюється компенсація систематичних помилок і мінімізація похибок вимірювання.

Окрім зазначених факторів впливу на точність роботи чутливого елемента можуть впливати і інші зовнішні фактори, які можуть відрізнитися у залежності від середовища, наприклад атмосферний тиск чи вологість.

Узагальнюючи можна зазначити, що точність чутливих елементів, зокрема і у гравіметрах, залежить від якості проектування системи, її виготовлення, а також від умов вимірювання та робочого середовища.

2.2. Різновиди гравіметрів, їх функціональність та принципи роботи

У процесі розвитку науки й техніки, зокрема у сфері вимірювань прискорення сили тяжіння, що діє на досліджуваний об'єкт, було розроблено певну кількість різновидів гравіметрів. Гравіметр - це прилад, який призначений для здійснення вимірювання параметрів гравітаційного поля. Гравіметри бувають оптичними, лазерними, кварцовими та іншими [5].

Гравіметр здатний виконувати вимірювання гравітаційного прискорення, що впливає на нього в різних точках на поверхні Землі і може відрізнитися у залежності від зміни густини гірських масивів, водойм, наявності певних корисних копалин та інших факторів.

Якщо гравіметр використовується для дослідження в сфері геології, геофізиці тощо, то зібрані дані підлягають подальшій обробці та аналізу, що дозволить визначити гравітаційне поле в досліджуваних регіонах.

Відповідно гравіметри здатні вимірювати навіть маленькі зміни в прискоренні, що можуть виникати. Завдяки застосуванню різного роду чутливих елементів та технологій можна досягти задовільного рівня точності вимірювання змін гравітаційного поля.

Варто зазначити, що чутливі елементи в гравіметрах є центральними компонентами, які відіграють основоположну роль для можливості проведення вимірювання. Основна їх здатність це можливість реагувати на зміни вимірюваного параметра в досліджуваному середовищі і чим досконаліший ЧЕ тим точніше буде результат вимірювання. У поєднанні з іншими складовими системи вимірювання формується вихідний сигнал, зазвичай електричний, який вже можна обробляти, досліджувати та використовувати.

2.3. Огляд існуючих рішень у сфері вимірювання ПСТ

У таблиці 2.1 нижче відображено перелік існуючих гравіметрів авіаційних гравіметричних систем, зокрема тип, марка, точність, чутливість та недоліки.

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика існуючих АГС [6]

Тип	Марка	Точність вимірювання g, мГал	Поріг чутливості, мГал	Недоліки
Кварцові	ГАЛ-С	8	0,3	Велика стала часу; недостатні швидкодія та точність; низька чутливість
	ГІ 1/1	6	0,1	
	«Чекан-АМ»	6	0,1	
	«ГРІН-2000/М»	5	0,2	
Пружинні	GSS	10	0,2	Важкопрогнозований дрейф пружних властивостей пружинного елемента; недостатня швидкодія та точність
	L-R-S		0,1	
Магнітні	Bell BGM-2, Bell VM-IX, Automatics VM-7G, МАГ-1М, GT-1А, GT-2А	8	0,2	Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатні швидкодія та точність

Продовження таблиці 2.1. Порівняльна характеристика існуючих АГС [6]

Струнні	ГСД-М	8	0,1	Нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів; недостатні швидкодія та точність
	«ГРАВІТРОН-М»	5	0,1	
Гіроскопічні	PIGA 16, 25	3	0,1	Висока собівартість; складність конструкції; недостатні швидкодія та точність

2.3.1. Розгляд та аналіз гіроскопічного гравіметра

У цій частині буде розглянуто гіроскопічний гравіметр, його принцип роботи та особливості застосування.

Гіроскопічний гравіметр це спеціалізований пристрій, який використовує гіроскопічні принципи та містить у своїй конструкції гіроскопічний маятник для проведення вимірювання.

Гравіметри типу PIGA, розроблені Массачусетським технологічним інститутом, мають відносно високу чутливість, їх використовують як гравіметри АГС та елементи систем навігації (точність 3 мГал). Однак такий гравіметр має одну вісь чутливості, паралельну осі обертання гіроскопа щодо платформи, і вимірює проекцію g на цю вісь. Для визначення напрямку гравітаційної вертикалі потрібна дуже точна стабілізація осі чутливості гравіметра у напрямку гравітаційного поля Землі. Крім того, обертання гіроскопа навколо осі зовнішньої рамки зумовлює появу інструментальних похибок PIGA [6].

Відомі гравіметри АГС, які описано вище, мають переваги, а також суттєві недоліки основні з них такі [6]:

- 1) недостатньо висока точність вимірювання (3-10 мГал);
- 2) обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС;

3) нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів;

4) невисока швидкодія і відсутність можливості оперативної обробки інформації та ін.

Розглядаючи гіроскопічні гравіметри варто згадати та описати гірогравіметр на базі гіроскопічного інтегратора. На рисунку 2 показано схему інтегровального гіроскопічного гравіметра.

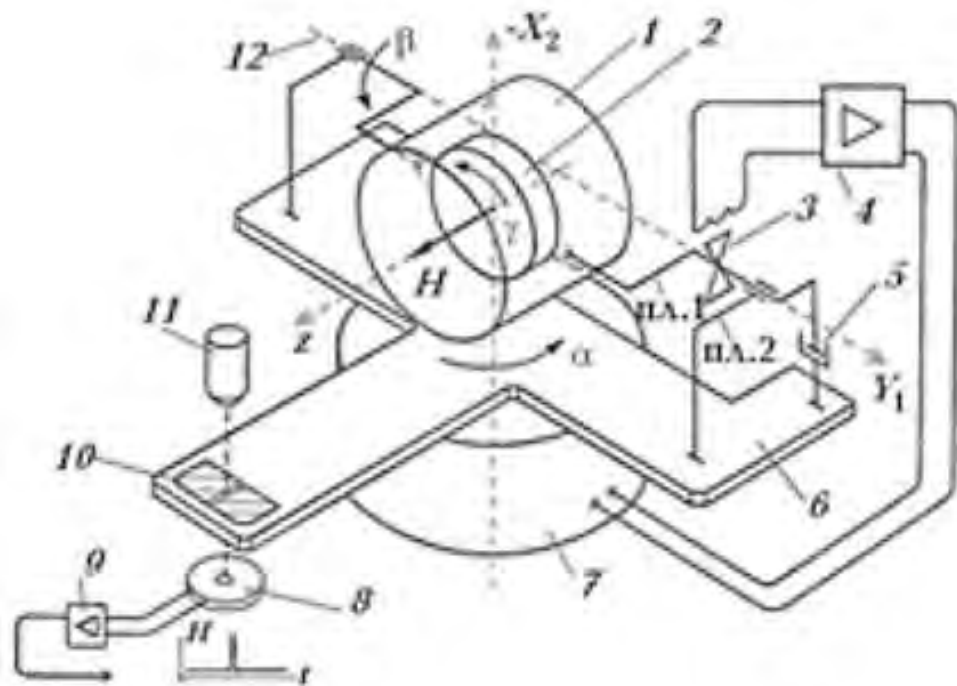


Рисунок 2.1. Інтегровальний гіроскопічний гравіметр [6]

Розглянемо основні складові елементи інтегровального гіроскопічного гравіметра та опишемо його принцип роботи.

Основні елементи: гіромотор 1 із берилієвим ротором 2, який встановлено на осі 12 внутрішнього підвісу так, щоб була створена маятниковість відносно цієї осі. Зовнішньою рамкою є поворотна платформа 6, на якій розміщено стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора. На осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора закріплено ротор датчика 3 кута β повороту гіромотора, статор датчика 3 закріплено на платформі 6. Для

демпфірування кутових коливань гіромотора 1 навколо осі 12 внутрішнього підвісу передбачено рідинний демпфер 5 [6].

Підбором робочого зазору між лопаткою та корпусом рідинного демпфера забезпечують підвищення коефіцієнта в'язкого тертя до $f_1=2,3 \cdot 10^{-3}$ кг·м²/с. Сигнал з датчика 3 підсилюють і спрямовують на датчик моменту, яким слугує серводвигун 7, що прикладає до поворотної платформи обертовий момент, пропорційний сигналу з датчика 3 кута β . На поворотній платформі 6 передбачено зміщену у радіальному напрямку світлонепроникну мембрану 10 із щілиною, над якою розташоване джерело 11 вузько спрямованого світла. На кожному оберті поворотної платформи 6 зосереджений світловий промінь проходить над фотоприймачем 8. При цьому виникає короткий імпульс, що інформує про здійснений поворотною платформою 6 повний оберт навколо осі 12. Точність відліку становить 5 мкрад. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) спрямований через підсилювач 9 на схему блока електронних лічильників. Пристрій вміщений у алюмінієвий захисний циліндр (магнітний захист) [6].

У підсумку варто зазначити, що такі гравіметри не є повністю досконалими та мають свої обмеження й перелік недоліків. Вони мають складну конструкцію, а відповідно є дорогими у виготовленні. У додаток до цього вони мають відносно низьку швидкодію та не забезпечують достатню точність вимірювання у певних випадках де необхідно вимірювати досить малі гравітаційні зміни.

При проектуванні різного роду та спрямування систем варто враховувати ці обмеження та обирати відповідне обладнання. Для багатьох вимірювань гіроскопічні гравіметри можуть бути корисними і надають можливість виконувати вимірювання з достатньою точністю, але у певних випадках може бути доречним застосування інших засобів, приладів та методів для досягнення бажаного результату, враховуючи вартість системи, складність побудови та обслуговування, а також габаритні розміри та середовище у якому буде проводиться вимірювання.

2.3.2. Розгляд струнного гравіметра

У цій частині буде детально розглянуто особливості та метод роботи струнного гравіметра, а також можливості які він надає. На рисунку 3 зображення схему струнного гравіметра.

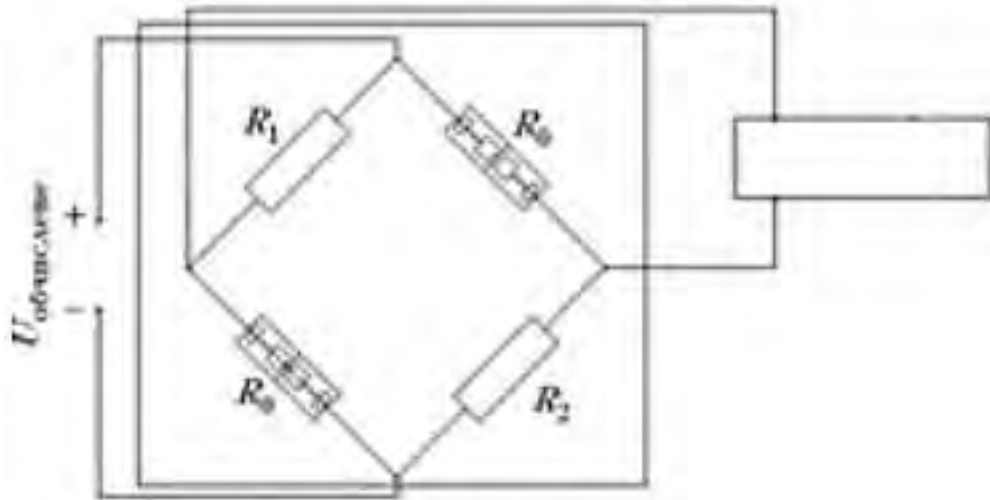


Рисунок 2.2. Схема струнного гравіметра [6]

Струнний гравіметр (СГ) має чутливий елемент (позначено пунктиром), виконаний у вигляді двох ідентичних струнних пристроїв, струни яких виконані із тензочутливого матеріалу, розміщених у герметичному корпусі і електрично увімкнених за мостовою схемою у два протилежні плечі моста, а вихід моста підключено до пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра. Така конструкція СГ забезпечує лінійну залежність вихідного сигналу від g , що дає змогу значно збільшити точність вимірювань g . Вихідний сигнал досліджуваного СГ не залежатиме від змін температури, тиску, вологості, оскільки вони впливають на частоти обох струн двох ідентичних струнних гравіметрів однаково, але з протилежними знаками [6].

Струнний гравіметр має високу точність вимірювання, високу вібраційну та ударну міцність, надійність, частотномодульований вихідний сигнал, високу потужність вихідного сигналу, а також малі габарити та вагу. Він дозволяє

виконувати швидко і точну цифрову реєстрацію прискорення сили тяжіння. Актуальною науковотехнічною задачею є підвищення точності та швидкодії вимірювань величини прискорення сили тяжіння шляхом створення автоматизованого струнного гравіметра авіаційної гравіметричної системи [8].

Також потрібно зазначити, що струнні гравіметри мають досить непогану точність, відносно високу надійність і стійкість від ударів. Такі гравіметри дають змогу проводити вимірювання зміни прискорення сили тяжіння швидше, забезпечуючи досить непогану точність. Струнні гравіметри також мають невеликі габаритні розміри, що також розширює їх сферу застосування.

Але все ж таки такі гравіметри можуть мати незадовільну точність для вимірювання дуже малих змін, а також з часом струна може втрачати свої фізичні властивості, а відповідно точні вимірювання стають неможливими. Але такі гравіметри дешевші і можуть застосовуватися для певного переліку задач.

2.3.3. Розгляд балістичного лазерного гравіметра з двовимірним відеозображенням

У цій частині розглядається функціональність та особливості балістичного лазерного гравіметра з двовимірним відеозображенням.

БЛГ з двовимірним відеозображенням має досить складну конструкцію, поєднуючи у собі декілька технологій та може бути застосований у сфері вимірювання прискорення сили тяжіння, що надає змогу використовувати його у відповідних системах.

Такого роду гравіметри мають перспективу забезпечення досить хорошої точності вимірювання, але вони мають відносно низьку швидкодію тому потребують дослідження способів поліпшення та впровадження автоматизованих рішень, що в результаті сприятиме підвищенню точності вимірювання, але на даний момент точність недостатня для певного переліку сфер застосування.

Схема такого гравіметра продемонстрована на рисунку 4.

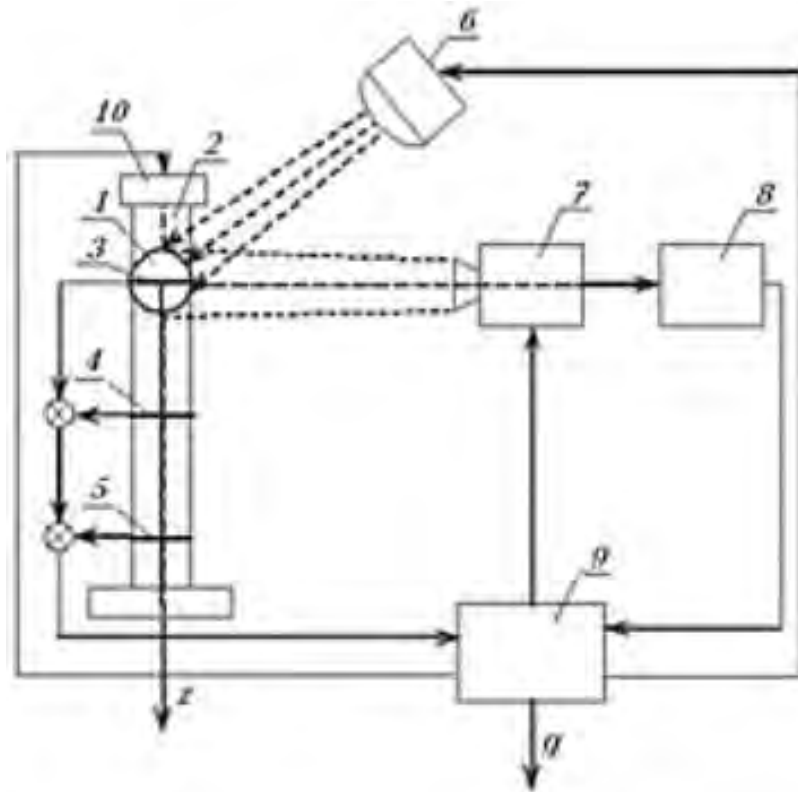


Рисунок 2.3. Балістичний лазерний гравіметр з двовимірним відеозображенням[6]

Розглянемо основні складові БЛГ та їх взаємодію для проведення вимірювання.

Пробне тіло 1 закріплюють в електромагніті 10. З виходу цифрової ЕОМ 9 на вхід електромагніту 10 надходить сигнал, за яким електромагніт відпускає пробне тіло 1. Воно починає рухатися вниз по прозорій трубці 2 під дією ПСТ. Оскільки пробне тіло 1 виконано у формі шару з магнітними властивостями, то під час його проходження повз котушки 3-5 у них виникає електрорушійна сила (ЕРС). З виходів котушок 3-5 на вхід цифрової ЕОМ 9 надходить електричний сигнал, що складається з трьох імпульсів напруги, кожен з яких зумовлений виникненням ЕРС у котушках. Часові затримки $1 W^{\wedge}$, $2 W^{\wedge}$, $3 W^{\wedge}$ кожного з імпульсів відносно моменту початку руху пробного тіла 1 пропорційні абсолютному значенню ПСТ g та відстаням $ш_1$ - $ш_3$ від електромагніту 10 до котушок 3-5. Для підвищення точності вимірювання у БЛГ використовують

також другий канал вимірювання абсолютного значення ПСТ. У цьому каналі цифрова ЕОМ 9 керує роботою джерела 6 імпульсного освітлення та відеокамерою 7. При цьому відеокамера 7 формує зображення електромагніту 10, прозорої трубки 2 та самого пробного тіла 1. Пристрій 8 апроксимації за зображенням, що надійшло від цифрової ЕОМ 9, визначає поточні координати центра маси пробного тіла 1, зафіксованих на зображенні відеокамерою 7, що відповідають періодам генерування імпульсів освітлення джерелом 6 імпульсного освітлення. Потім у ЕОМ 9 об'єднуються результати вимірювань абсолютного значення ПСТ, отримані у першому та другому вимірювальних каналах цього БЛГ [6].

Підсумовуючи розглянуту інформацію про БЛГ варто зазначити, що він є дуже потужним інструментом для проведення вимірювань ПСТ та дослідження гравітаційних полів, але дуже важливим залишається задача подальшого вдосконалення системи та розробки автоматизованих рішень, що дозволить підвищити точність та ефективність пристрою, що також розширить можливості його застосування.

2.3.4. Розгляд та аналіз використання одноканального п'єзоелектричного гравіметра. Переваги на недоліки, застосування

У цій частині увагу буде приділено опису, особливостям та функціональності п'єзоелектричного гравіметра задля визначення його переваг, недоліків, потреби в покращенні системи та використання.

Одним із найбільш досконалих є п'єзоелектричний чутливий елемент або п'єзогравіметр. Хоча його точність на сьогоднішній день, також, не є достатньою (2 мГал). Він вимірює один із компонентів прискорення сили тяжіння на вісь чутливості, при чому, він не може вимірювати повний модуль ПСТ. Актуальною є задача підвищення точності п'єзоелектричного ЧЕ автоматизованої системи керування [7, 17].

На рисунку 5 зображено конструкцію п'єзоелектричного гравіметра з вказанням його конструкційних складових.

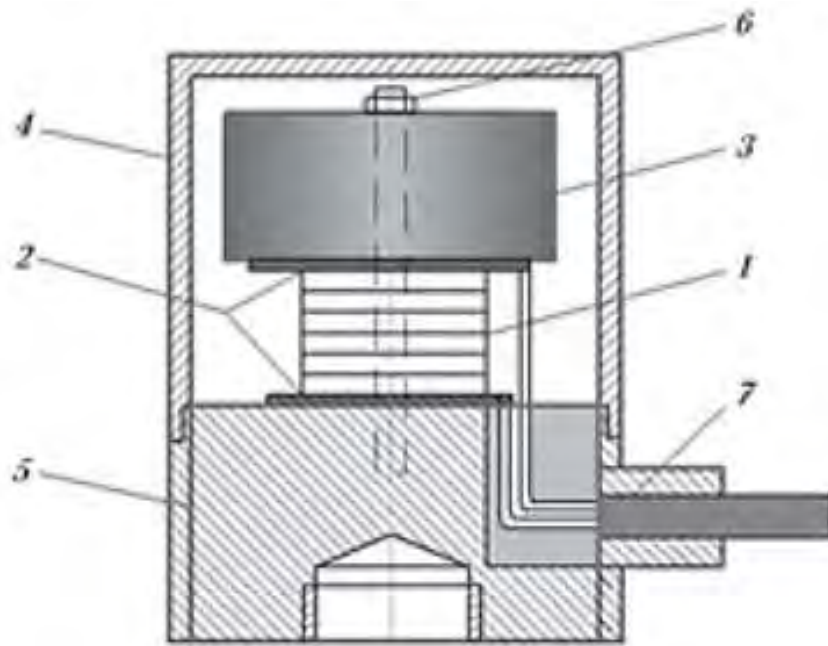


Рисунок 2.4. Конструкція п'єзоелектричного гравіметра: 1 - п'єзоелектричного елемент, 2 - ізолятори, 3 - інерційна маса, 4 - основа, 5 - герметичний корпус, 6 - гвинт, 7 - вивідний кабель [6].

Чутливий елемент ПГ складається із п'єзоелектричного елемента (ПЕ) 1, що працює на деформації стиснення-розтягування, ізоляторів 2 на торцях ПЕ та інерційної маси (ІМ) 3. З метою підвищення надійності та міцності конструкції чутливий елемент пружно притиснений до основи 4 гвинтом 6. ПГ за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем. П'єзоелектричний елемент 1 є багатошаровою конструкцією (п'єзопакетом), що складається із шарів кристалічного ніобату літію. У новому ПГ автоматизованої АГС розв'язано проблему фільтрації вихідного сигналу - встановлена частота власних коливань ПГ дорівнює частоті перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та сигналу основної завади вертикального прискорення ЛА. Це забезпечує відсутність впливу основної завади - вертикального прискорення ЛА, та суттєво підвищує точність вимірювання [6].

П'єзоелектричні гравіметри це важливий тип гравіметрів, які для виконання вимірювання ПСТ використовують п'єзоелектричні чутливі елементи. Вони мають непогану точність, але все ж таки недостатню для певного роду застосування, мають невеликі габарити та масу.

Ці гравіметри мають високий потенціал для використання в автоматизованих системах БПЛА, але відповідно це вимагає подальшого розвитку та пошуку нових рішень щодо покращення. Дослідження їх властивостей дозволить зробити їх більш універсальними та корисними для застосування у різних галузях, які потребують точного та швидкого вимірювання ПСТ.

2.4. Трикоординатний гравіметр. Опис особливостей та функціональності

Трикоординатний гравіметр - це спеціальний прилад, побудований на базі чутливих елементів, які здатні на основі певного методу виконувати вимірювання ПСТ у трьох взаємо перпендикулярних площинах O_x , O_y та O_z .

Такого роду прилади дуже важливі для геодезистів, геофізиків та інших науковців, які займаються певними дослідженнями наприклад в сфері геології та дослідженні поверхні землі. Використовуючи трикоординатні гравіметри можна отримати більше важливої інформації так як вимірювання виконується у трьох осях одночасно.

Один із найкращих гравіметрів який здатен вимірювати ПСТ у всіх трьох осях - п'єзоелектричний, хоча зазначається [7, 18] що його точність також не є досконалою та становить 2 мГал, але варто зазначити що розглядаємий трикоординатний п'єзогравіметр є більш точний і здатний вимірювати з точністю 1 мГал.

Підвищення точності вимірювання у ТП забезпечується за рахунок того, що по кожній осі вимірювання (O_z , O_x і O_y) прискорення сили тяжіння встановлено чутливий елемент A_z , A_x , A_y , сконструйований з двома каналами, у

кожному з них встановлено один, ідентичний до інших, п'єзоелемент. Інерційні маси закріплено внизу п'єзопластини п'єзоелементів одного каналу та зверху п'єзопластини п'єзоелементів іншого каналу. П'єзопластини кожного чутливого елемента мають частоту власних коливань, що визначається у точці перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та основної завади вертикального прискорення рухомого об'єкта (у даному випадку, літака). П'єзоелемент першого каналу чутливого елемента працює на основі деформації розтягу, п'єзоелемент другого каналу - на основі деформації стиснення [7].

Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів кожного чутливого елемента надсилаються до входів операційних підсилювачів, які, окрім підсилення здійснюють функцію підсумовування сигналів, після цього надходять на входи бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) [7].

У БЦОМ виконуються потрібні розрахунки для визначення повного вектора та модуля прискорення сили тяжіння [7].

Трикоординатні п'єзогравіметри є досить перспективними для застосування у сфері автоматизованих систем керування, зокрема для БПЛА, так як їх використання забезпечить підвищення точності вимірювання ПСТ, тому їх дослідження, модернізація та впровадження є дуже актуальним питанням на даний момент.

2.5. Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто та описано сутність трикоординатних чутливих елементів, їх різновиди, особливості та застосування.

Було проаналізовано різні підходи та методи вимірювання прискорення сили тяжіння, описано певний перелік гравіметрів де детально розглянуто їх принципи роботи, функціональність, переваги, а також недоліки. В описі кожного з розглянутих гравіметрів додано відповідну схему.

Особливу увагу було приділено трикоординатному п'єзоелектричному гравіметру, який є одним із тих, що здатен забезпечити достатню точність вимірювання, зокрема для реалізації автоматизованої системи керування БпЛА так як здатен враховувати та компенсувати завади які виникають у процесів польоту.

Трикоординатний п'єзогравіметр виділяється завдяки своїй точності та можливості вимірювати ПСТ у всіх трьох площинах з точністю 1 мГал. Хоча варто зазначити що він, як і всі інші, має певні обмеження щодо точності, але все ж залишається одним із найкращих пристроїв для проведення такого роду вимірювань.

Застосування трикоординатних ЧЕ є надзвичайно актуальним завдяки зростанню вимог щодо точності вимірювання у різних сферах. Зростаюча потреба у забезпеченні високої точності та надійності вимірювань робить ці ЧЕ важливими складовими багатьох систем та пристроїв, тому актуальність розвитку цієї сфери буде надалі зростати.

3. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРИКОРДИНАТНИЙ ГРАВИМЕТР. ПРИНЦИП РОБОТИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ

3.1. Модель та принцип роботи п'єзоелектричного гравіметра. Використання явища п'єзоефекту для виконання вимірювання

Явище п'єзоефекту представляє собою здатність певного матеріалу генерувати електричний заряд в результаті зовнішнього механічного впливу, або іншого впливу яке здатне впливати на деформацію п'єзоелемента. Зазвичай це деформація стиску або розтягування.

Електричний заряд, який утворюється в результаті можна виміряти, обробити та використати для розрахунку значення сили яке діє на цей елемент, враховуючи відомі характеристики матеріалу з якого виготовлений п'єзоелемент. Знак цього заряду напряду залежить від виду деформації.

П'єзоефект є оберненим. Це означає, що коли вмістити таку пластину в електричне поле, параметри якого змінюються, геометричні розміри пластини будуть змінюватись. Ця зміна тим більша, чим більший електричний потенціал, під яким перебувають грані п'єзопластини. До матеріалів, що мають п'єзоелектричні властивості відносяться: кварц, сегнетова сіль, фосфат амонію, кераміка титанату барію тощо [11].

Для побудови точних вимірювальних пристроїв використовують пластинки з кварцу, що пояснюється його високою механічною та електричною міцністю. П'єзоелектричні властивості кварцу меншою мірою залежать від температури і не змінюються навіть при температурі до 250-300 °С. Важлива перевага кварцу - лінійність його характеристик при навантаженні аж до зруйнування [11].

Значення заряду, який утворюється в результаті деформування можна розрахувати за наступними формулами:

1) Кількість електрики що виникла, якщо сила F напрямлена вздовж електричної осі (прямий п'єзо ефект) [11]:

$$Q = k_1 F_x \quad (3.1)$$

2) Кількість електрики що виникла, якщо сила F_x напрямлена вздовж механічної осі (зворотній п'єзо ефект) [11]:

$$Q = -k_1 \frac{S_x}{S_y} F_x \quad (3.2)$$

де Q - електричний заряд, Кл;

F_x, F_y - сили, що діють перпендикулярно до оптичної осі пластин, Н;

S_x, S_y - площі поверхонь, перпендикулярних до відповідних осей;

k_1 - п'єзоелектрична стала.

П'єзо ефект, що виникає під дією сили F_x , називають поздовжнім. Його зазвичай використовують при побудові п'єзоелектричних приладів [11, 19, 20].

Під дією сили F_y заряди також виникають на гранях, проте їх величина, згідно з рівнянням (3.2), залежить від геометричних розмірів цієї пластини. Цим іноді користуються, щоб підвищити значення параметра чутливості п'єзоперетворювача [11, 19, 20].

Одним із основних параметрів будь-якого чутливого елемента є його чутливість. Чутливість визначає здатність елемента, у даному випадку п'єзоелектричного перетворювача, реагувати на певний достатньо малий зовнішній вплив.

Параметр чутливості ЧЕ є дуже важливим, так як визначає мінімальне значення, яке піддається вимірюванню та на точність системи загалом, що обмежує або навпаки розширює можливості його застосування.

Важливим питанням стає покращення параметра чутливості, зокрема шляхом вдосконаленням їх конструкції та будови.

Щоб збільшити чутливість п'єзоперетворювача, використовують відразу кілька пластин, які послідовно навантажують однією й тією самою силою (див. рис. 6). У п'єзопакеті всі грані пластин електрично з'єднані однойменно

зарядженими гранями. Таким чином, загальний заряд, що його дістають на перетворювачі, дорівнює сумі зарядів окремих пластин [11, 19, 20].

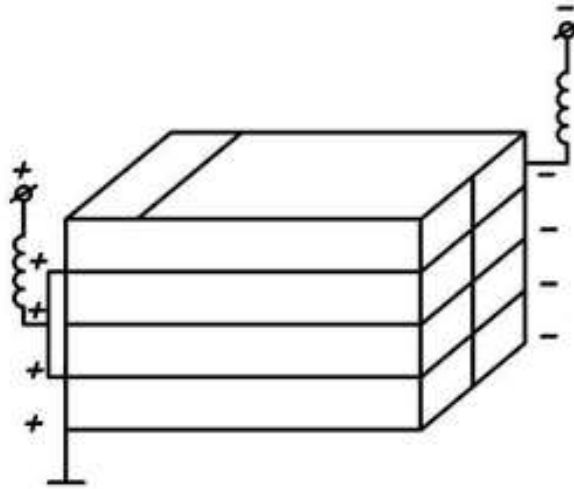


Рисунок 3.1. Схема п'єзопакета [11]

Щоб дістати п'єзопакет, грані пластин, з яких знімається заряд, металізують колоїдним сріблом і далі склеюють однойменно зарядженими гранями, використовуючи це металізоване покриття. Як правило, пакети із п'єзопластин мають більшу міцність, ніж окремі п'єзоелементи. Проте такі п'єзопакети мають нижчу частоту коливань [11, 19, 20].

Власна частота однієї пластини розраховується за наступною формулою:

$$f_1 = \frac{k_2}{d} \quad (3.3)$$

де k_2 - коефіцієнт пропорційності;

d - товщина п'єзопластини, мм.

Згідно з описом [11] значення коефіцієнта пропорційності відрізняється у залежності від матеріалу пластини і має наступні значення для матеріалів які широко поширені:

- для кварцу - 2280 кГц · мм;
- для сегнетової солі - 1540 кГц · мм;
- для титанату барію - 2200 кГц · мм.

У п'єзоелектричному чутливому елементі для вимірювання прискорень, вібрацій (див. рис. 8) при дії прискорення уздовж вертикальної осі виникає інерційна сила, що діє на масу 2. Під дією цієї сили п'єзоелектричні пластини стискаються. Виникає пропорційний електричний заряд, який через провідник знімається. Величина п'єзоелектричних зарядів буде пропорційна до величини прискорення, що далі реєструється [11, 19, 20].

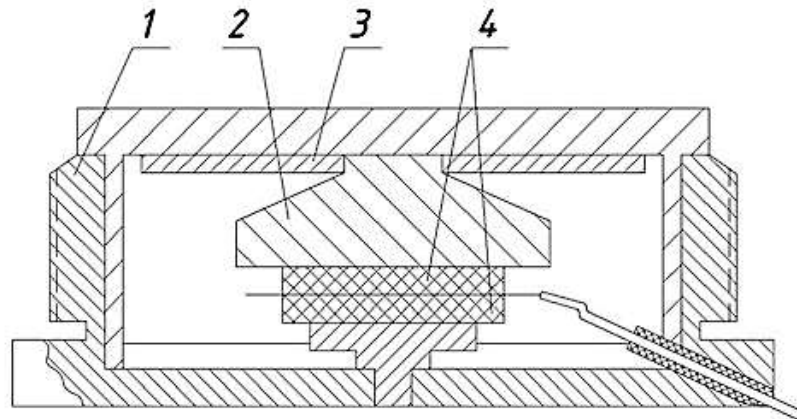


Рисунок 3.2. Схема п'єзоелектричного гравіметра: 1 - корпус, 2 - маса, 3 - мембрана, п'єзоелектричні пластини [11]

Згідно з розглянутою інформацією [11] можна зазначити, що ПГ мають високу точність, малі габаритні розміри та маленьку вагу, але при цьому у простому варіанті їх виконання вони здатні лише на виконання реєстрації швидкоплинних процесів.

3.2. Розгляд та аналіз трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра. Принцип роботи

Використовуючи три чутливі елементи A_z , A_x , A_y , маємо можливість вимірювати повний вектор сили тяжіння, а не тільки одну його складову, відповідно [7, 18]:

$$\vec{g} = \vec{g}_x + \vec{g}_y + \vec{g}_z \quad (3.4)$$

Також його використання забезпечує можливість вимірювання повного модуля прискорення сили тяжіння, відповідно [7]:

$$|g| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \quad (3.5)$$

Також усувається вплив вертикального прискорення АСК на покази ТП відразу двома способами [7]:

1) використання у трьох п'єзоелементів A_z , A_x , A_y додаткового каналу вимірювання;

2) завдяки встановленню частоти власних коливань трьох п'єзоелементів гравіметра A_z , A_x , A_y , що дорівнюють частоті перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та сигналу основної завади вертикального прискорення літального апарату.

З огляду на вище зазначене можна визначити, що трикоординатний п'єзогравіметр має здатність забезпечити значне підвищення точності вимірювання, зокрема шляхом додавання другого каналу вимірювання, що додає можливість компенсації похибок, які викликані зовнішнім впливом.

На рис. 9 зображено принципову схему розглядаємого трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра.

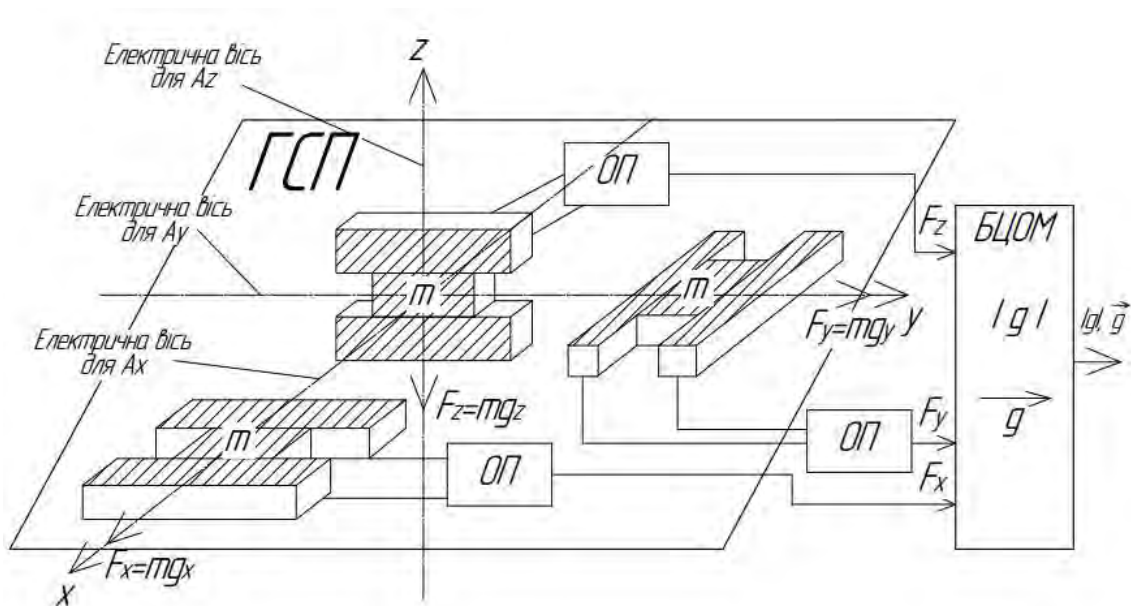


Рисунок 3.3. Принципова схема трикоординатного п'єзогравіметра [7]

При задіянні для трьох двоканальних п'єзоелементів A_z , A_x , A_y , згідно алгоритму роботи схеми вимірювання, на входах бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) (див. рис. 3.4.) 13 отримуємо три сигнали, що містять подвійні значення прискорення сили тяжіння по кожній осі $2g_z$, $2g_x$ та $2g_y$, де відсутнє значення вертикального прискорення рухомого об'єкта (РО) та інструментальних похибок від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, через вплив зміни вологості, температури та тиску зовнішнього середовища. Дані сигнали підсилюються та підсумовуються у операційних підсилювачах ОП 10, ОП 11, ОП 12 і відправляються до БЦОМ 13, у якому відбувається розрахунок повного модуля ПСТ [7]:

$$|g| = \sqrt{(2km g_x)^2 + (2km g_y)^2 + (2km g_z)^2} = 2km \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} \quad (3.6)$$

де m - інерційні маси 7,8,9 кожного п'єзоелементі;

k - п'єзоелектрична стала (однакова у всіх п'єзоелементів через їх ідентичність).

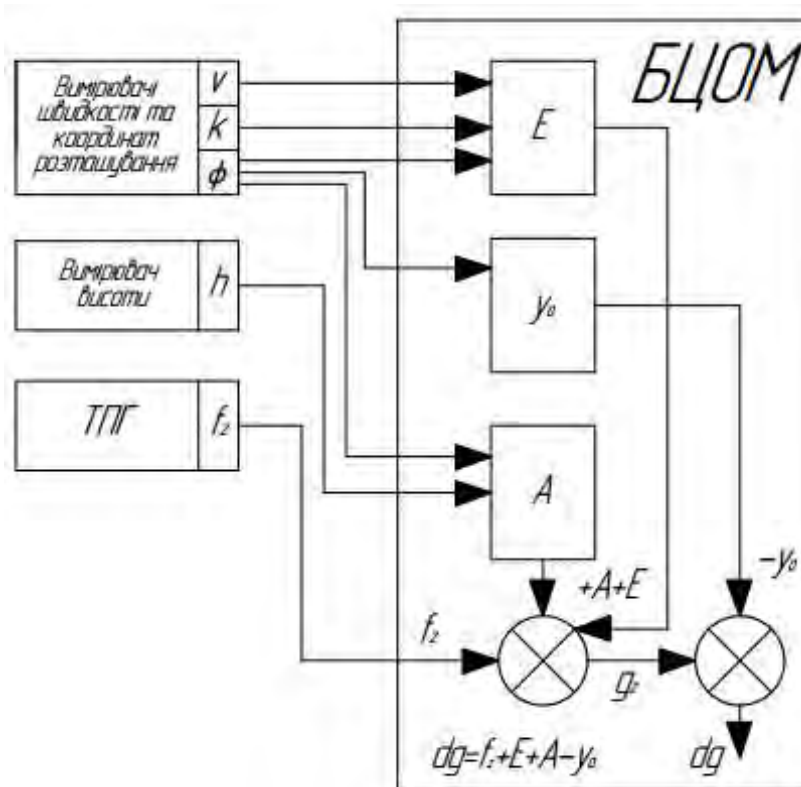


Рисунок 3.4. Функціональна схема автоматизованої системи із ТПГ

Основною перевагою та відмінністю трикоординатного ЧЕ є те, що він містить три вимірювальних компоненти A_z , A_x , A_y з подвійними каналами, кожен з яких вимірює відповідні прискорення $2g_z$, $2g_x$ та $2g_y$. Такий підхід дає змогу замінити необхідність використання трьох окремих пристроїв на кожну вісь вимірювання, що робить систему менш габаритною та гнучкою. Відповідно у якості вихідного інформаційного сигналу трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра маємо значення повного вектору та модуля ПСТ, що описується за формулами 3.4 - 3.6.

Використання такого принципу вимірювання дає можливість значно усунути вплив негативних зовнішніх факторів, похибок що виникають у результаті конструктивних особливостей, а також усунути вплив температури, вологості та тиску, що робить ТП точнішим та надійнішим за альтернативні однокомпонентні чи двокомпонентні варіанти.

3.3. Підвищення точності вимірювання

У конструкції трикоординатного п'єзогравіметра використовуються по кожній осі чутливості двоканальні гравіметри (рис. 3.3).

Для підвищення точності вимірювання використовують різні методи компенсації похибок, що викликані впливом температури, вологості, тиску тощо, зокрема виготовляють чутливі елементи з двома каналами, відповідно такі чутливі елементи називаються двоканальними.

У новому трикоординатному п'єзоелектричному чутливому елементі використовуються три вимірювальних двоканальних компоненти, завдяки чому і забезпечується підвищена точність вимірювання.

На рис. 3.5 зображено структурну схему двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

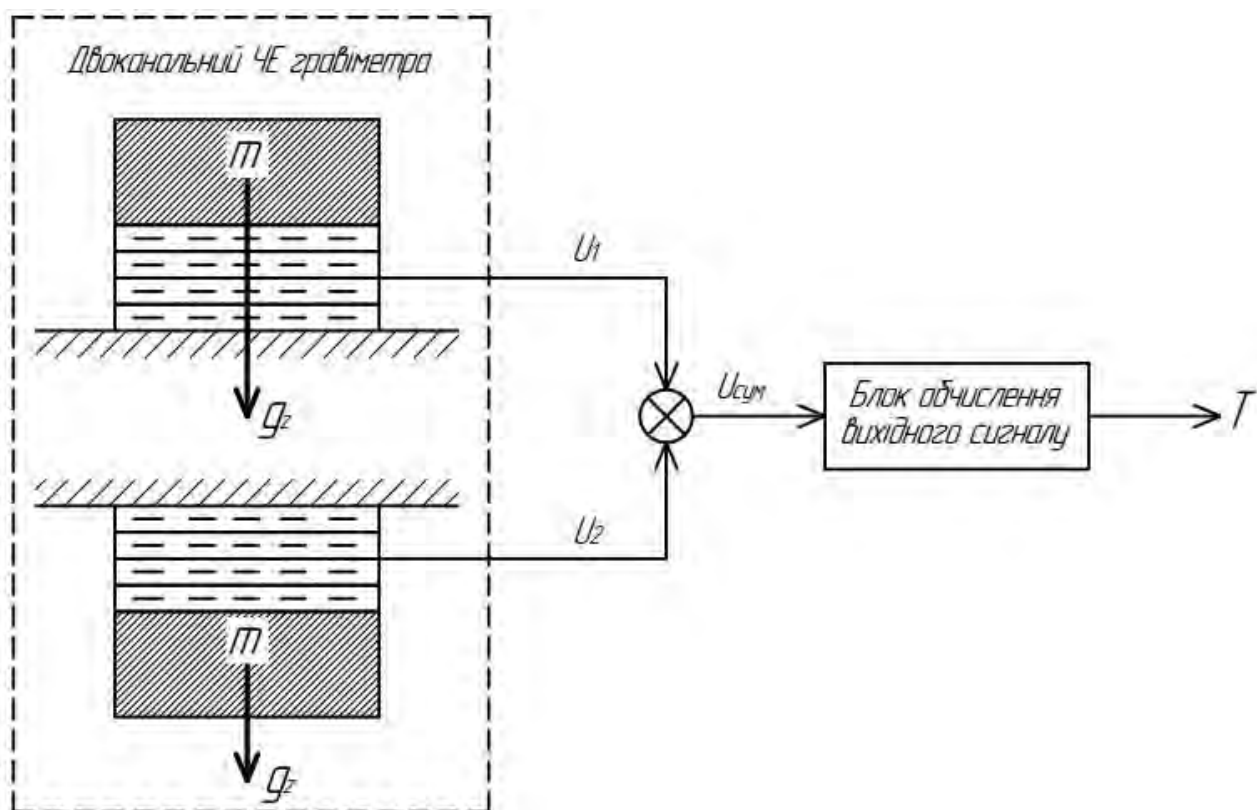


Рисунок 3.5. Структурна схема двоканального п'єзоелектричного гравіметра

У конструкції двоканального ПГ маємо два ідентичні пакети п'єзопластин. Вони розташовані вниз та вгору відповідно до свого положення, та утворюють електричні заряди у результаті стиснення та розтягування. На виході каналів маємо вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 . Ці сигнали надходять на суматор та утворюють один сигнал, який обчислюється у наступному блоці. На виході обчислювального блоку отримуємо вихідний сигнал гравіметра, який можна обробляти, оцінити та використовувати.

Двоканальний ПГ працює у такий спосіб. На п'єзоелементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення h ЛА та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин і мас, від впливу зміни температури, вологості і тиску зовнішнього середовища [10].

Відповідно маємо наступні вирази для вихідних сигналів на каналах гравіметра:

$$u_1 = k(mg_z + m\ddot{h} + \Delta i) \quad (3.7)$$

$$u_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{h} - \Delta i) \quad (3.8)$$

де u_1 - вихідний електричний сигнал п'єзопластин першого каналу ЧЕ;

u_2 - вихідний електричний сигнал п'єзопластин другого каналу ЧЕ;

m - вага інерційної маси у кожному каналі;

k - п'єзоелектрична стала.

Загальний вихідний сигнал на виході суматора матиме наступний вигляд:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z \quad (3.9)$$

У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал Т пристрою 2 обчислення вихідного сигналу ПГ, який містить подвоєний сигнал прискорення сили тяжіння. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення h та інструментальних похибок Δi [10].

Варто описати рівняння руху автоматизованої АГС для визначення аномалії прискорення сили тяжіння Δg згідно до розглянутих матеріалів [10].
Маємо наступне рівняння руху:

$$\Delta g = fz + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2\cos^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2w_3 v \sin k \cos \varphi - \quad (3.10)$$

$$2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + w_3^2 h \cos_2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0$$

де fz - вихідний сигнал ПГ;

v - швидкість ЛА;

r - радіус місцезнаходження ЛА;

e - стиск еліпсоїда;

φ - географічна широта;

k - курс ЛА;

ω_3 - кутова швидкість обертання Землі;

h - висота ЛА над еліпсоїдом;

\dot{h} - вертикальна швидкість ЛА;

\ddot{h} - вертикальне прискорення ЛА;

γ_0 - довідкове значення прискорення сили тяжіння.

Відповідно можемо отримати рівняння руху АГС у наступному вигляді:

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0 \quad (3.11)$$

де f_z - вихідний сигнал гравіметра АГС;

E - поправка Етвеша. Відповідно:

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} \cos k \sin 2\varphi \quad (3.12)$$

A - поправка за висоту. Відповідно маємо:

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi \quad (3.13)$$

Довідкове значення прискорення сили тяжіння:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} \left(1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi \right) \quad (3.14)$$

де $\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2$ - довідкове екваторіальне значення ПСТ.

Рівняння руху АГС має усереднені значення поправки Етвеша, поправки за висоту, вертикальної швидкості та питомої сили. При польотах на БПЛА усереднення присутнє на кожній лінії здійснення польоту [13].

Вихідний сигнал гравіметра після введення поправок можна записати у вигляді наступного виразу [10]:

$$T = f_z = g_z + \sigma_{\ddot{h}} \quad (3.15)$$

де $\sigma_{\ddot{h}}$ - похибка від впливу вертикального прискорення літального апарату.

Аналізуючи інформацію з публікації [10] можна сказати, що є необхідність забезпечення процесу фільтрації вихідного сигналу із частотою 0,1 рад/с, так як у такому варіанті суттєво зменшується вплив вертикального прискорення.

Також зазначається, що використання низькочастотних фільтрів із частотою зрізу 0,1 рад/с, як це поширено у більшості інших гравіметрів не є оптимальним рішенням, так як особливості умов експлуатації впливають на електронні складові такого фільтра, що в результаті не може забезпечити стабільне значення зрізу.

Пропонується інший спосіб фільтрації вихідного сигналу. Фільтрація відбувається за рахунок створення чутливого елемента нового гравіметра автоматизованої АГС у вигляді п'єзопакета, частота власних коливань ω_0 якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод - 0,1 рад/с [10]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_n E_n}{h_n m}} = 0,1 \text{ рад/с} \quad (3.16)$$

де m - вага інерційної маси;

s_n , E_n і h_n - площа, модуль пружності матеріалу і висота п'єзoeлемента відповідно.

Використовуючи даний метод фільтрації [10] вихідного сигналу п'єзoeлектричного гравіметра є можливість відокремлювати прискорення сили тяжіння g_z та вертикальне прискорення h . Одночасно це сприяє усуненню впливу деяких компонентів, які впливають на точність вимірювання та мають частоту більшу за 0,1 рад/с, наприклад вплив поступальних та кутових віброприскорень.

3.4. Висновки до розділу 3

У цьому розділі було розглянуто питання математичного опису моделі роботи п'єзоелектричного гравіметра, його особливостей та забезпечення оптимальної точності.

Розглянуто явище п'єзоефекту, здатність деяких матеріалів генерувати електричні заряди в результаті деформації та можливість інтерпретації цього заряду в інформативний вихідний сигнал з визначеною залежністю. Визначено, що існує важливість забезпечення достатньої чутливості, у даному випадку використовуючи п'єзопакети, які складаються з декількох поєднаних п'єзопластин.

Описано принципову схему нового трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра, розглянуто його основні відмінності від інших типів, таких як одно- та дво- координатні. Використання трикоординатного ПГ має ряд переваг, але одна з найважливіших це здатність одночасного вимірювання ПСТ у трьох напрямках. Наведено вирази визначення повного вектору сили тяжіння для даного типу ПГ, що надає можливість виконувати подальші розрахунки та аналіз отриманої інформації.

Проаналізовано використання двоканалних ЧЕ, зокрема і в будові трикоординатного ПГ. Визначено, що впровадження для кожного з трьох ПЕ другого каналу забезпечить високу точність вимірювання для кожної координатної площини, знизить вплив зовнішніх негативних чинників, похибок та вібрації, що підтверджують наведені формули у розділі.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОБОТА З ТРИКООРДИНАТНИМИ ЧУТЛВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

4.1. Програмування та робота з трикоординатними чутливими елементами на рівні програмного забезпечення. Автоматизація процесів вимірювання

В більшості сучасних автоматизованих системах реалізуються програмні алгоритми для забезпечення вимірювання та керування. Такий підхід спрощує побудову системи та організацію взаємозв'язків між складовими системи.

Для роботи з трикоординатними чутливими елементами можна використовувати різні обчислювальні системи (ЕОМ), мікроконтролери, мікрокомп'ютери тощо. У даному випадку обчислювальною системою виступає плата розробки на базі двох-ядерного мікроконтролера RP2040, який є 32-х бітним ARM мікроконтролером компанії Raspberry Pi (див. рис. 4.1).

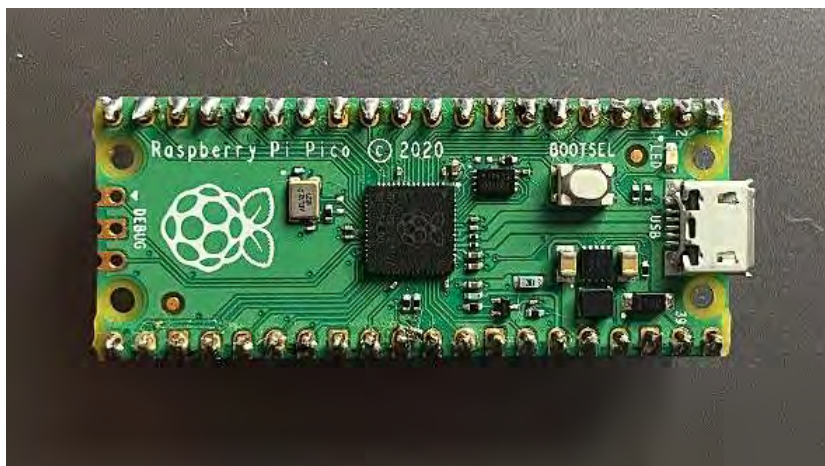


Рисунок 4.1. Плата розробки на база МК RP2040

Програмування може виконуватися різними мовами програмування та у різних середовищах. На даний момент популярними мовами програмування, які використовуються для мікроконтролерів, є C, C++, Python та їх діалекти. Мови C та C++ мають вищу продуктивність та швидкодію, використовуються для

програмування різних МК. Мова Python отримала поширення у сфері автоматизації завдяки популярності мінікомп'ютерів Raspberry Pi.

Так як у даному експериментальному дослідженні використовується платформа розробки Raspberry Pi Pico буде використано мову програмування Python, хоча існує можливість налаштування середовища для роботи з використанням C++, але це потребує певних зусиль і не завжди працює належним чином.

Для організації програмної взаємодії буде використано трикоординатний акселерометр та гіроскоп MPU6050 для визначення позиції у просторі та прискорення. Він містить три координатні площини вимірювання, і також побудований на базі п'єзоелектричного чутливого елемента.

Варто розглянути принцип програмного зчитування даних, отримання показників вимірювання, конвертацію даних у зручний формат для сприйняття людиною та інші аспекти.

Для початку розглянемо тестову функцію роботи з трикоординатним чутливим елементом.

```
#Тестова функція виведення даних
def MPU6050_test(address):
    imu = MPU6050(address)
    while True:
        ax = round(imu.accel.x, 2)
        ay = round(imu.accel.y, 2)
        az = round(imu.accel.z, 2)
        gx = round(imu.gyro.x)
        gy = round(imu.gyro.y)
        gz = round(imu.gyro.z)
        print(ax, "\t", ay, "\t", az, "\t", end = "\r")
        print(gx, "\t", gy, "\t", gz, "\t", end = "\r")
        sleep(0.2)
```

Тестова функція реалізує процес отримання, конвертації та виведення користувачу даних про положення в просторі за визначеними осями, відповідно

A_x , A_y та A_z . Також визначається значення прискорення в трьох осях, відповідно маємо показники G_x , G_y та G_z .

Зазвичай для організації системи використовують інтерфейси передачі даних, у даному випадку інтерфейс I²C. Процес зчитування чи керування потребує отримання адреси на відповідній шині, таким чином реалізується адресація між складовими системами, у даному випадку функція приймає дані щодо адреси у якості вхідного параметру.

Для зчитування даних щодо позиції використовується функція `accel`, а також функція для визначення прискорення `gyro`. Для кожного виклику функції вказується вісь за якою потрібно виконувати вимірювання. Отриманий результат за допомогою функції `round` виконує округлення числа до сотих, та записує результат у відповідну змінну для зберігання поточного значення.

Після виконання вимірювання усі збережені дані щодо показників виводяться у консоль, де можна спостерігати за змінами параметрів в реальному часі.

Вимірювання повторюються циклічно з періодичність 0,2 секунди. Так як мікроконтролер є двох-ядерним існує можливість розділення виконання функцій, щоб виконувати операції вимірювання паралельно.

Ця функція є узагальненою для різних трикоординатних ЧЕ та датчиків на їх основі, але звісно необхідно змінити наповнення у відповідності до типу датчика. Для того, щоб програма працювала використовуються два додаткових файли, відповідно `imu` та `vector3d`, які описують принцип взаємодії мікроконтролера з датчиком та базові функції. Вони необхідні для того, щоб організувати розрахунки та розпізнавання типу датчика.

Нижче показано перелік підключених обов'язкових файлів для роботи з виконавчою програмою. Вони включають файли для роботи з портами, часом та чутливим елементом.

```
import machine
import utime
from time import sleep
```

```
from imu import MPU6050
```

Розглянемо частину налаштування процесу вимірювання та ідентифікації вимірювального пристрою.

```
#Використовуємо інтерфейс I2C на 0 (SDA) і 1 (SCL)
sda = machine.Pin(0)
scl = machine.Pin(1)
```

У даному фрагменті алгоритму реалізовано визначення інтерфейсу I²C, зокрема визначено шину даних `sda`, а також шину синхронізації `scl` відповідно. Це базове налаштування інтерфейсу для роботи з його використанням.

Наступний фрагмент визначає частоту, а також описує об'єкт інтерфейсу, який приймає дані які вказують на піни та частоту.

```
freq = 400000
i2c = machine.I2C(0, sda = sda, scl = scl, freq = freq)
devices = i2c.scan()
```

Сканується наявність пристроїв в контексті інтерфейсу `devices = i2c.scan()`, на основі чого відбувається спроба отримати доступ, або отримується відмова в доступі, так як пристрій не визначений.

В результаті сканування шини отримуємо масив адрес, який вказує на кожен підключений пристрій.

```
if len(devices) == 0:
    print("No found device!")
else:
    print("Devices found: ", len(devices))
    for device in devices:
        print("Address device: ", hex(device))
    MPU6050_test(i2c)
```

Якщо пристрій не виявлено у системі, то виводиться відповідне повідомлення про помилку, а також відбувається спроба отримати доступ повторно.

Також перевіряється відповідність знайденого пристрою до того з яким ми хочемо працювати `MPU6050_test(i2c)`.

Після вирішення усіх питань з приводу визначення вимірювального пристрою та його налаштувань, викликається раніше описана функція MPU6050_test, вказується відповідна адреса та виводиться інформація з вимірювальними даними (див. рис. 4.2).

```
I2C devices found: 1
Address device: 0x68
ax 1.03          ay -0.0          az 0.01
```

Рисунок 4.2. Виведення показників вимірювання акселерометра

У даному випадку було зроблено виведення даних з округленням до другого знаку після коми.

При роботі з трикоординатними чутливими елементами, зокрема і для роботи з трикоординатним гравіметром, є певні особливості, зокрема варто враховувати:

1) забезпечення ініціалізації та початкового налаштування - важливо виконати ініціалізацію приладу, налаштувати інтерфейс, визначити адресу пристрою який підключений до використовуюваного інтерфейсу, зробити налаштування щодо передачі та читання даних, тощо;

2) фільтрація та калібрування - початкова перевірка точності вимірювання та реакції, визначення коефіцієнтів калібрування, внесення поправок, перевірка на наявність помилок вимірювання;

3) читання та обробка даних - важливо організувати алгоритм доступу до отримання вимірювальних даних, виконати конвертацію даних у числове значення та зберегти у комірку пам'яті з подальших оновленням даних. Важливо при конвертації даних забезпечити максимальну точність, так як при використанні округлення відбувається скорочення кількості цифр у значенні або взагалі збільшується чи зменшується до найближчого;

4) обробка помилок та винятків - у програмному алгоритмі варто передбачити можливі помилки та виняткові ситуації. Це важливо для стабільності роботи приладу та відсутності впливу помилкових даних.

4.2. Особливості організації проведення гравіметричних вимірювань.

Експериментальні дослідження ТПГ

Організація проведення досліджень щодо вимірювань з використанням п'єзогравіметра включає у собі певний перелік ключових етапів та особливостей. Ці етапи, включно з налаштування, потрібно виконати для того, щоб отримати достовірні вимірювальні дані у процесі дослідження.

При проведенні дослідження авіаційної гравіметричної системи з ПГ на БПЛА можуть використовуватись такі компоненти авіаційної гравіметричної системи [12, 16]:

- 1) чутливий елемент автоматизованої системи на базі гравіметра;
- 2) наявність бортової цифрової обчислювальної машини;
- 3) наявність записуючого пристрою та «БАКСВ» - бортовий апарат комплексу сейсмічних вимірювань;
- 4) наявність інерціальної навігаційної системи (ІНС) «I-11», а також «РДС-2» для навігаційних вимірювань тощо.

Організація та проведення гравіметричних вимірювань також може включати в собі наступні складові та етапи (також у випадку використання БПЛА):

- 1) перевірка компонентів системи літального апарату, калібрування датчиків за необхідності;
- 2) вибір території та точок вимірювання, налаштування траєкторії - передбачає врахування географічних особливостей, та визначення розташування точок вимірювання з урахуванням забезпечення інформативності результатів. Вимірювання повинні бути рівномірними та послідовно структурованими;
- 3) урахування особливостей умов середовища - варто враховувати вплив атмосферних умов та потенційний вплив на якість проведення дослідження, врахування та компенсація впливу;
- 4) тривалість вимірювання - визначення оптимального часу та тривалості проведення вимірювань. Цей аспект впливає на кількість даних, що у свою чергу

має наслідок у точності результатів обробки та інформативності отриманих результатів;

5) обробка та аналіз вимірюваних даних - застосування алгоритмів для корекції та фільтрації даних, щоб прибрати з вибірки наявні помилки. Проведення статистичного аналізу для визначення точності та достовірності результатів вимірювання.

Дослідження з використанням безпілотного літального апарату повинні проводитися в автономному режимі з налаштованим маршрутом руху. Також рух літального апарату може бути прямолінійним, або мати певні особливості маршруту в залежності від призначення дослідження. Врахування усіх описаних вище аспектів є важливим для того, щоб забезпечити оптимальний процес дослідження та вимірювання для гравіметричної системи.

Для проведення експериментальних досліджень використовуються спеціальні установки та пристрої. На рис. 4.3 показано принципову схему установки, що використовується для експериментальних досліджень трикоординатного ПГ.

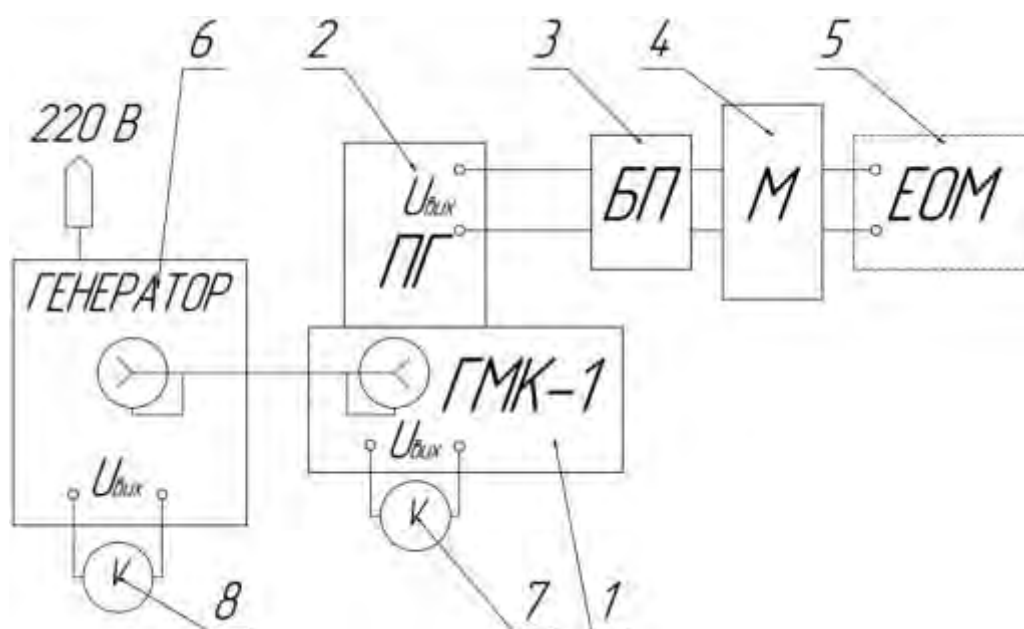


Рисунок 4.3. Принципова схема установки для експериментальних досліджень ТГГ:

1 - ГМК-1; 2 - ТПГ; 3 - блок підсилення вихідного сигналу ТПГ; 4 - мікросистема зібрання даних (модуль введення-виведення); 5 - ЕОМ; 6 - генератор змінної напруги живлення; 7 - вольтметр для реєстрації напруги генератора; 8 - вольтметр для реєстрації напруги індукційного перетворювача.

На рисунку 4.4. показано зовнішній вигляд описаної установки для дослідження.

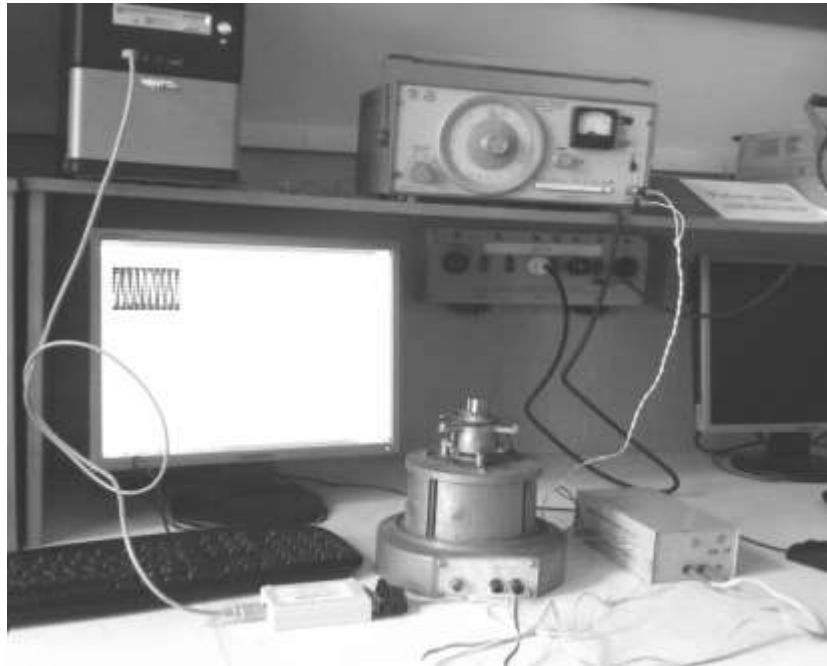


Рисунок 4.4. Зовнішній вигляд установки для експериментальних досліджень ТПГ [17]

Розглянемо більш детально особливості вібростенда експериментальної установки. Основним компонентом установки дослідження є вібростенд - генератор механічних коливань, який конструктивно виконаний у вигляді двох магнітопроводів 8, 10. Вказані магнітопроводи жорстко скріплені та утворюють єдину конструкцію соленоїдного типу. Стрижень 7 може рухатись у середині соленоїда, створеного двома магнітопроводами 8, 10 [17].

Рушійну силу для переміщень стрижня 7 створюють індукційні перетворювачі 1, 3, обмотки 1, 2 та 3, 4. Обмотки 1, 3 виконують функції збудження, а 2, 4 - управління [15].

На рис. 4.5 зображено зовнішній вигляд розглядаємого ГМК.



Рисунок 4.5. Зовнішній вигляд генератора механічних коливань ГМК-1 [17]

Індукційні перетворювачі у схемі системи призначені для забезпечення перетворення вхідного електричного сигналу збудження у вихідний механічний сигнал переміщення стрижня [17]. Розглянемо детальніше внутрішню будову та структуру генератора механічних коливань (див. рис. 4.6)

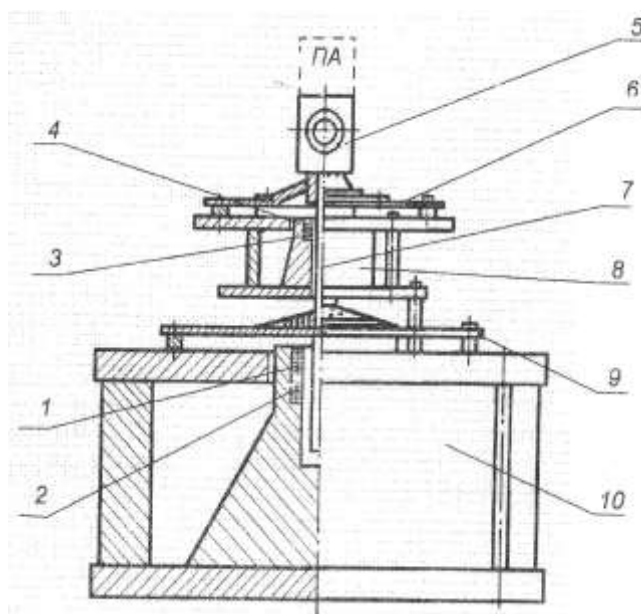


Рисунок 4.6. Генератор механічних коливань: 1, 3 - генераторні обмотки; 2, 4 – обмотки управління; 5 - робочий стіл; 6, 9 - гнучкі мембрани; 7 - стрижень; 8,10 - магнітопроводи [17]

Стрижень 7 із обмотками 1, 2 та 3, 4 утримується гнучкими опорами у вигляді мембран 6 і 9 спеціального типу, які поєднують достатню жорсткість з великим значенням лінійної ланки силової характеристики. Закріплення стрижня з обох сторін мембранами дозволяє звести до мінімуму рух по напрямках, які не співпадають із поздовжньою віссю. Це забезпечить стрижню лише один ступінь свободи у потрібному напрямку вертикальної осі. Тому, якщо через генераторну обмотку пропустити струм, то сила, що створюється генераторною обмоткою призведе до вертикального переміщення стрижня [17].

Відповідно, згідно з зазначеним описано, таким чином утворюються коливальні прискорення стрижня розглянутого вібростенду. Ці коливання впливають на робочий стіл, на якому і знаходиться трикоординатний ПГ.

4.3. Особливості руху АГС на базі п'єзоелектричного гравіметра.

Визначення аномалій

Рівняння руху автоматизованої системи визначає, як змінюється положення гравіметра, у складі автоматизованої системи наприклад як складова частина безпілотного літального апарату, в просторі з проходженням певного визначеного часу.

Рівняння руху автоматизованої гравіметричної системи (рівняння 3.10) у даному випадку використовується як базове.

Наступним етапом варто описати вираз для визначення середнього вихідного сигналу вимірювання за визначений часовий проміжок t_2-t_1 . Відповідно маємо наступний вираз [12, 16]:

$$f_z = K_{\text{ПГ}} \left[\frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1} \right], \quad (4.1)$$

де $K_{\text{ПГ}}$ - коефіцієнт передачі конкретного п'єзогравіметра;

$x(t_n)$ - переміщення ІМ в проміжок часу.

На основі цих даних можемо отримати вираз для визначення аномалії на основі п'єзоелектричної гравіметричної системи [12, 16]:

$$\Delta \bar{g} = K_{III} \left[\frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1} \right] + \frac{1}{t_2 - t_1} \left(\frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \bar{\varphi} \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \bar{k}}{2} \right) \right] \right\} + \right. \\ \left. + 2\bar{w}_3 \bar{v} \cdot \sin \bar{k} \cdot \cos \bar{\varphi} - 2\bar{h} \frac{e}{r} \bar{v} \cdot \cos \bar{k} \cdot \sin 2\bar{\varphi} \right) + \frac{1}{t_2 - t_1} \left(2 \frac{\bar{\gamma}_0 \bar{h}}{r} + \omega_3^2 \bar{h} \cos^2 \varphi \right) - , \quad (4.2) \\ - \frac{1}{t_2 - t_1} \gamma_{0e} \left(1 + 0,0052884 \sin^2 \bar{\varphi} - 0,0000059 \sin^2 2\bar{\varphi} \right)$$

де $\Delta \bar{g}$, \bar{v} , $\bar{\varphi}$, \bar{k} , \bar{h} , \bar{h} - усереднені параметри.

Відповідно було отримано рівняння для визначення аномалії Δg за допомогою п'єзоелектричного гравіметра. Воно може бути застосоване, як робоче рівняння для проведення аерогравіметричних вимірювань [12, 16].

Вимірювання аномалій гравітаційного поля, зокрема з використанням ПГ, може мати декілька напрямів застосування:

1) дослідження геологічної структури - зміни гравітаційного поля можуть вказувати на різні геологічні особливості землі в регіоні, наприклад наявність родовища та інших геологічних особливостей;

2) екологічні дослідження - аномалії можуть виникати у певних місцях в результаті дії землетрусів, повені тощо, зміни якої можна або необхідно дослідити;

3) наукові дослідження поверхні - можуть використовуватися для вивчення фізичних процесів та аномалій гравітаційного поля Землі;

4) навігація - аномалії можуть мати різний вплив на БПЛА. Їх можна використовувати для корегування траєкторії, на основі визначення місця знаходження, а також може вплинути на зміну траєкторії, відхилення, коливання тощо. Визначення аномалій ПСТ є важливим параметром для автоматизованої системи керування БПЛА.

4.4. Експериментальні дослідження характеристик п'єзоелектричного гравіметра

На початку проводимо дослідження залежності амплітуди вихідної напруги $U_{ПГ}$, що отримана з трикоординатного ПГ від частоти коливань вібростенда - ω , для амплітуди напруги генератора при $U_{ГЕН} = 5, 7, 8$ В. Отримані результати дослідження додано до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Залежність вихідної напругу трикоординатного ПГ від частоти коливань вібростенда при різних значеннях $U_{ПГ}$

ω , рад/с		0,01	0,033	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35
	$U_{ген}$										
$U_{ПГ}$, мВ	5 В	52,4	56,7	74	121,9	53,8	87	89,6	6,1	40,0	9,8
	7 В	71	75,5	107,1	174,1	70,7	125,8	113	10,8	72,6	13,2
	8 В	79	81,3	118	192	77,8	154,6	143	14	65,2	17

На рисунку 4.7 зображено отриманий графік залежності вихідної напруги ТПГ частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження.

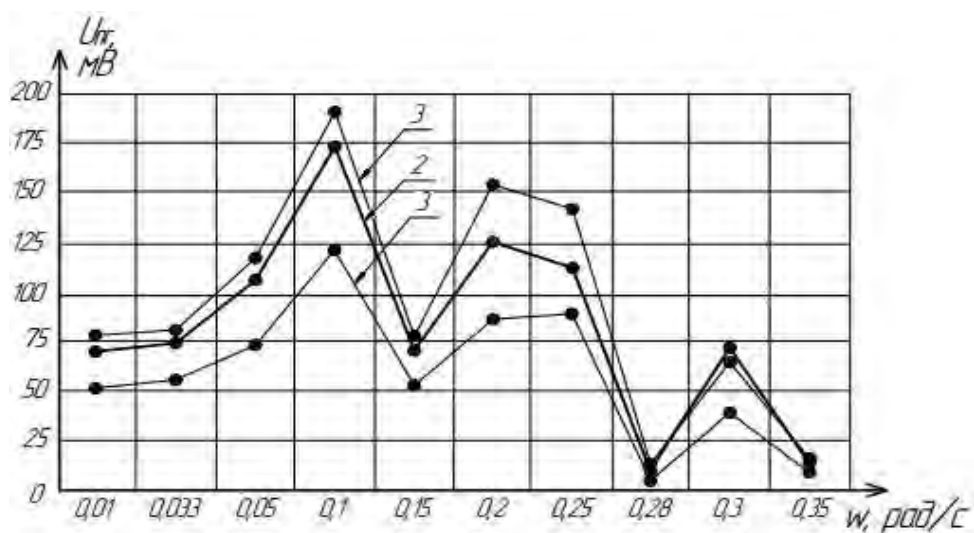


Рисунок 4.7. Залежність вихідної напруги ТПГ від частоти коливань вібростенда при: 1 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 5$ В; 2 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 7$ В; 3 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 8$ В

Визначено на основі даних з таблиці 4.1 та графіку 4.3, що максимальна амплітуда вихідної напруги досліджуваного трикоординатного ПГ наявна за значень частоти $\omega = 0,1$ рад/с при $U_{ген} = 5$ В; $U_{ген} = 7$ В; $U_{ген} = 8$ В, що також відповідає частоті власних коливань ТПГ, де $\omega = \omega_0 = 0,1$ рад/с. Дослідження з використання ЕОМ підтверджують ці дані.

Наступним етапом проводимо дослідження залежності амплітуди $U_{вих}$ ПГ від частоти коливань вібростенда для амплітуди $U_{ГЕН} = 5, 7, 8$ В. Усі отримані результати занесено до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Залежність вихідної напруги ПГ від частоти коливань вібростенда при різних значеннях $U_{ПГ}$

ω , рад/с		0,01	0,033	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35
	$U_{ген}$										
$U_{ПГ}$, мВ	5 В	52,4	56,7	74	121,9	53,8	87	89,6	6,1	40,0	9,8
	7 В	71	75,5	107,1	174,1	70,7	125,8	113	10,8	72,6	13,2
	8 В	79	81,3	118	192	77,8	154,6	143	14	65,2	17

На основі отриманих даних будемо графік (див. рис. 4.4) залежності амплітуди $U_{вих}$ ПГ від частоти коливань вібростенда.

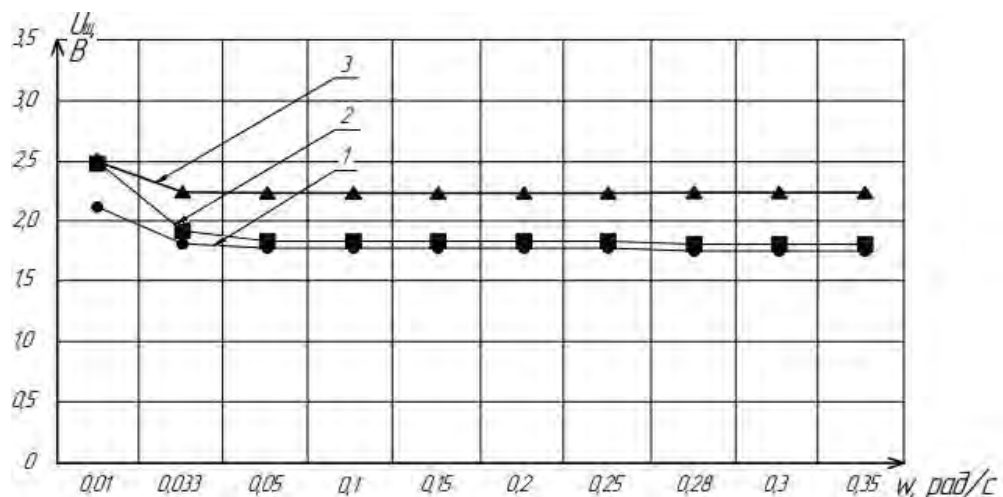


Рисунок 4.4. Залежність амплітуди вихідної напруги ПГ від частоти коливань вібростенда при: 1 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 5$ В; 2 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 7$ В; 3 - $U_{ПГ} = \psi(\omega)$ при $U_{ген} = 8$ В

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що $U_{вих}$ ПІ не має залежності від частоти коливань вібростенда та є прямо пропорційним $U_{ГЕН}$. Визначено що існує відхилення при значенні $\omega \leq 0,033$ рад/с від лінійної характеристики (що можна помітити на графіку 4.4). Таке відхилення спричинено технологічними похибками виготовлення ВП.

Довідкове значення прискорення сили тяжіння визначається згідно виразу 3.14. Визначимо експериментальне значення, враховуючи, що довідкове екваторіальне значення ПСТ становить $\gamma_{0e} = 9,78049$ м/с², та $\varphi = 50,24446$. Відповідно маємо:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2(\varphi) - 0,0000059 \sin^2(2 \cdot \varphi)) = 9,810501 [\text{м/с}^2]$$

Також розраховується значення систематичної похибки Δg , для кожного вимірювання протягом певного часу:

$$\Delta g = |\bar{g}_{ЕКСП}(t) - \gamma_0|, \quad (4.3)$$

де $\bar{g}_{ЕКСП}(t)$ - усереднене значення вихідного сигналу п'єзоелектричного гравіметра на основі вимірювань протягом визначеного часу.

Усереднене значення вихідного сигналу можна визначити використовуючи наступний вираз:

$$\bar{g}_{ЕКСП}(t) = \frac{1}{N_{ЕКСП} + 1} \sum_{i=0}^{N_{ЕКСП}} \bar{g}(t_i), \quad (4.4)$$

де $N_{ЕКСП}$ - кількість вимірів на проміжок часу;

$g(t_i)$ - i -те значення вихідного сигналу п'єзоелектричного гравіметра.

Важливий параметр, який також підлягає розрахунку це абсолютна похибка вимірювань $\Delta g_{ЕКСП}$. Відповідно її значення визначається наступним чином:

$$\Delta g_{ЕКСП} = \frac{\sigma_{\bar{g}_{ЕКСП}}}{\sqrt{N_{ЕКСП}}} t_p, \quad (4.5)$$

де $\Delta\sigma_{\bar{g}_{ЕКСП}}$ - значення середньоквадратичного відхилення $\bar{g}_{ЕКСП}(t)$, яке визначається наступним чином:

$$\Delta\sigma_{\bar{g}_{ЕКСП}} = \sqrt{\frac{1}{N_{ЕКСП}} \sum_{i=0}^{N_{ЕКСП}} [\bar{g}(t_i) - \bar{g}_{ЕКСП}]^2}; \quad (4.6)$$

t_p - значення коефіцієнту оберненого розподілу Стюдента, яке визначається за наступним виразом:

$$t_p = qt(p, d), \quad (4.7)$$

де p - довірча ймовірність;

d - число ступенів свободи, яке у даному випадку визначається як кількість експериментів.

Розглянемо похибки п'єзогравіметра, які зумовлені вібраціями при довірча ймовірність $p = 0,9$.

Таблиця 4.1. Похибки п'єзогравіметра, які зумовлені вібраціями

ω , рад/с	$\bar{g}_{ЕКСП}(t)$, мГал	$\Delta g_{ЕКСП}$, мГал	Δg , мГал
0	981100,3761	0,001136	0,00006001
0,5	981103,2946	0,006184	2,91861022
1,0	981103,4298	0,048067	3,05381611
5,0	981105,7721	0,581020	5,39611120
10,0	981108,9362	0,851001	8,89863610
30,0	981113,4471	2,764100	13,0710563

З таблиці можна сказати, що при нульовому значенні $\omega = 0$ рад/с вихідний сигнал гравіметра має значення 0,00006 мГал, що є оптимальним довідниковим значенням.

Також з таблиці можна визначити, що точність вимірювання 1 мГал забезпечується при наявних вібраціях орієнтовно до 10 рад/с. Збільшення частоти вібрації спричинятиме значене погіршення точності вимірювання.

Також варто розглянути питання резонансу при певних частотах [13, 14] зокрема це частоти: 0,033; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 рад/с. Тому варто розглянути та оцінити вплив вібрацій цих частот на точність вимірювання пристрою.

Таблиця 4.2. Похибки п'єзогравіметра, які зумовлені вібраціями у резонансних частотах

ω , рад/с	$\bar{g}_{ЕКСП}(t)$, мГал	$\Delta g_{ЕКСП}$, мГал	Δg , мГал
0	981000,3761	0,001136	0,00006
0,033	981000,5046	0,191160	0,1286
0,05	981000,5798	0,378130	0,2038
0,1	981101,1799	0,962309	0,8038
0,2	981101,5961	0,411891	1,2201
0,3	981102,4886	0,384961	2,1126

Аналізуючи дані таблиці можна сказати, що точність вимірювання п'єзоелектричним гравіметром у випадку виникнення заданих резонансних частот є здатним забезпечити точність 1 мГл. На рис. 4.3. представлено графічні результати цифрового моделювання та експериментальних даних.

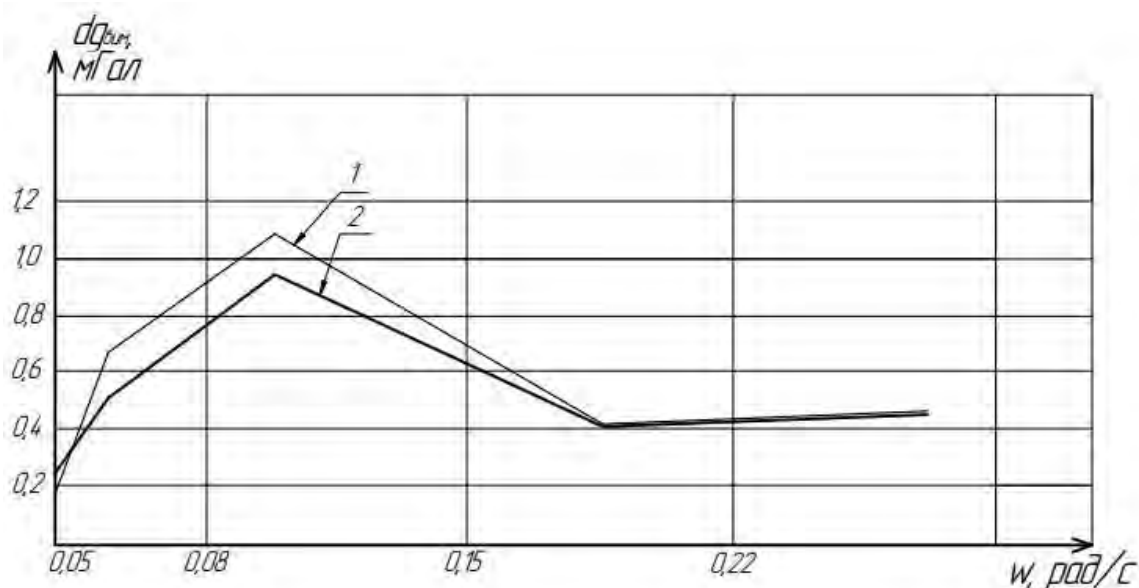


Рисунок 4.3. Результати порівняння цифрового моделювання та експерименту:

1 - цифрове моделювання; 2 - експеримент

4.5. Метрологічні характеристики п'єзоелектричного гравіметра в автоматизованій системі

Метрологічні характеристики, у даному випадку ТПГ, визначають його здатність забезпечити високу точність та правильність вимірювальних даних. Для того, щоб визначити значення цих характеристик проводять різного характеру експериментальні дослідження у різних робочих умовах, включно з лабораторними і наближеними до реальних.

Дані характеристики дозволяють визначити обмеження та можливості п'єзоелектричного гравіметра, а також визначає його доцільність застосування в конкретних умовах.

Відповідно, статична похибка п'єзоелектричного гравіметра становить:

$$\bar{g}_{\text{ТПГ}} = \bar{g}_{\text{ЕКСП}} \mp 6 \cdot 10^{-5} [\text{мГал}] \quad (4.1)$$

Відповідно у результаті впливу динамічних збурень, п'єзоелектричний гравіметр у система автоматизованого керування здатна працювати з наступною точністю:

$$\bar{g}_{\text{ПГАГС}} = \bar{g}_{\text{ЕКСП}} \mp 1 [\text{мГал}] \quad (4.2)$$

Відносна похибка такої автоматизованої системи на базі п'єзоелектричного гравіметра буде визначатися наступним чином:

$$\bar{g}_g = \frac{\Delta g}{g_{\text{ЕКСП}}} \cdot 100\% = \frac{1}{98110037556} \cdot 100\% = 1,019 \cdot 10^{-4}\% [\text{мГал}] \quad (4.3)$$

Умови експлуатації п'єзоелектричного гравіметра в автоматизованій системі [12]:

- 1) температура навколишнього середовища допустимо може становити від -20°C до $+50^\circ\text{C}$;
- 2) атмосферний тиск може становити від 90 кПа до 110 кПа [п. 3.7.5];
- 3) відносна вологість робочого середовища в $50 \pm 25\%$;

Розглянемо питання класу точності п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої системи (у лабораторних умовах) [12]:

- 1) абсолютна похибка п'єзогравіметра Δg становить 0,00006 мГал;

2) в умовах використання в системі автоматизованого керування безпілотного літального апарату абсолютна похибка Δg становить 1 мГал.

Таким чином отримується раніше зазначена точність вимірювання трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра в 1 мГал, що на даний момент може бути одним із кращих показників.

4.6. Висновки до розділу 4

У розділі 4 було розглянуто питання роботи з п'єзоелектричним гравіметром. Розглянуто аспекти практичного використання то програмної взаємодії трикоординатних чутливих елементів і ЕОМ, у даному випадку обчислювальним ядром була плата розробки на основі ARM мікроконтролера RP2040.

Розглянуто базову реалізацію взаємодії ЧЕ та МК, розроблено та описано функцію зчитування, конвертації, збереження та виведення даних у зрозумілий для сприйняття вигляд.

Розглянуто особливості роботи з трикоординатними ЧЕ, функціонал який необхідно реалізувати в алгоритмі та аспекти яких варто дотримуватися, а також особливості підключення через інтерфейс I²C.

Було описано сутність, технічні засоби та методика проведення експерименту з трикоординатним ПГ.

Визначено похибку гравіметричної системи, яка у даному випадку становить 0,00006 мГал. Визначено частоти за яких забезпечується точність вимірювання 1 мГл, а також перевірено вплив резонансних частот на точність. У даному випадку зазначені резонансні частоти критично не впливають на точність вимірювання системи.

Також було визначено, що систематична похибка п'єзоелектричного гравіметра є максимальною при частоті $\omega = 3\omega_0$, та відповідно становить 0,3 рад/с. Виявлено що дана похибка не має критичного впливу на точність вимірювання.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ SKYFANTOM»

Стартапи на сьогоднішній день стали ключовими складовими елементами інноваційного середовища, де творчі ідеї можуть швидко перетворюватися в успішний бізнес.

Стартап починається з інноваційної ідеї, але дуже важливим аспектом є його здатність залучити ресурси, інвестиції та аудиторію для реалізації задуманої концепції, проекту чи послуги.

Процес створення та виведення стартап-проекту включає перелік організаційних, розрахункових, аналітичних та інших процесів. Цей перелік може включати такі етапи як:

1) визначення ринкової перспективи - передбачає аналіз цільового ринку, визначення потреб споживачів, вивчення конкурентів та їх особливостей, а також визначення унікальних пропозицій і переваг проекту;

2) організаційні питання, щодо виробництва - передбачає пошук постачальників, розробка етапів та графіків виробництва. Визначення оптимальних шляхів щодо виробництва та логістики;

3) фінансовий аналіз - передбачає створення прогнозів та бізнес-плану, визначення потреб у фінансуванні, можливостей отримання прибутку, оптимальний час для початку отримання перших прибутків тощо;

4) проведення аналізу ринку - передбачає визначення потенційних ризиків, розробка стратегії просування та управління. Визначення економічного, технологічного та ринкового середовища для передбачення потенційних проблем, загроз та викликів;

5) просування ідеї та залучення інвестицій - передбачає розробку ефективної стратегії маркетингу та продажу. Підготовка та організації щодо проведення переговорів щодо залучення інвестицій.

Стартап-проекти стали важливими та сприяють розвитку інноваційних процесів, а також для економічного зростання. Успіх стартапу дуже сильно залежить від правильного виконання описаних етапів, організаційних процесів, вдало обраної стратегії розвитку та просування, а також ефективного управління ресурсами.

5.1. Опис ідеї проекту

Ідеєю стартап-проекту є розробка системи безпілотного літального апарату на основі використання трикоординатного чутливого елементу. Розробка призначена для виконання автоматизованого та безпілотного управління літальним апаратом з використанням нових технічних засобів.

Чутливі елементи які використовуються для забезпечення вимірювання у розробленій системі є трикоординатними, тобто вони здатні вимірювати одночасно усі три складові щодо орієнтації у просторі. Відповідно такий підхід дозволяє зменшити вартість, покращити точність, полегшити вагу тощо.

Цей апарат може використовуватися у різних цілях, зокрема для відеозйомки, дослідження поверхні землі, аеророзвідки, як FPV-дрон, тощо. У таблиці 5.1 описано зміст цієї ідеї та потенційно можливі ринки у межах яких варто здійснювати пошук груп потенційних клієнтів та зацікавлених осіб.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту [21]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи безпілотного літального апарату на основі використання нових трикоординатних чутливих елементів	Фото- та відеозйомка	Використання апарату для виконання фото- та відеозйомки різного цільового призначення

Продовження таблиці 5.1. Опис ідеї стартап-проєкту [21]

	Аеророзвідка	Здійснення аеророзвідки різного типу, та для різного призначення
	FPV-дрон	Використання апарату, як FPV-дрону різного цільового призначення, для виконання пілотованого керування в режимі реального часу

Отже пропонується нова система безпілотного/автоматизованого керування літальним апаратом, яка здатна виконувати перелік функцій для використання у низці галузей, зокрема дослідженні, господарстві, рятувальних операціях, розвідці, а також навіть для військових цілей. Пропонований варіант є більш дешевим та практичним у використанні.

Таблиця 5.2. Інформаційна карта стартап-проєкту [21]

Назва проєкту	Автоматизована система управління БпЛА «SkyFantom»
Автори	Назаренко А.О., Безвесільна О.М.
Анотація	Система дозволяє забезпечити кращі показники вимірювання прискорення вільного падіння, що дозволить покращити систему управління БпЛА і забезпечити кращу автономність
Термін реалізації	1 рік
Необхідні ресурси	Людські та фінансові
Опис проблеми, яку вирішує стартап-проєкт	Покращення автономності роботи та вимірювання ПСТ розширює можливості застосування БпЛА
Ціль	Мінімізувати похибку вимірювання ПСТ та розширити діапазон вимірювання
Очікуваний результат	Розширення сфери застосування та вимірювання

Наступним етапом виконуємо аналіз техніко-економічних переваг пропонованої ідеї проєкту у порівнянні із подібними пропозиціями конкурентів:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї проєкту;

- визначення попереднього кола конкурентів, зокрема проєктів-конкурентів, або товарів-замінників чи аналогів, що вже присутні на ринку.

Проводимо збір інформації щодо техніко-економічних показників для власної ідеї проєкту та проєктів-конкурентів;

- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї проєкту визначені показники, що мають:

- а) гірші значення (W, слабкі);

- б) аналогічні (N, нейтральні) значення;

- в) кращі значення (S, сильні).

Отримані результати аналізу заносимо до порівняльної характеристики сильних, нейтральних та слабких показників ідеї проєкту.

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [21]

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	DJI Mavic 3	Autel EVO Lite	iFlight ProTek35 6S			
1.	Габаритні розміри	Малі	Малі	Малі	Малі	-	+	-
2.	Вартість (економічність)	Низька	Висока	Висока	Середня	-	-	+
3.	Об'єм акумулятора (mAh)	5000	5000	6175	1400	-	+	-
4.	Тип двигуна	Безщітково-вий	Безщітково-вий	Безщітково-вий	Безщітково-вий	-	+	-

Продовження таблиці 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [21]

5.	Простота виробництва	Середня	Простий	Простий	Простий	+	-	-
6.	Екологічність	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	-	+	-

Пропонована ідея, по відношенню до пропозицій конкурентів, має перевагу у вартості системи надаючи хороші характеристики, зокрема об'єм акумулятора. Тому даний проєкт системи безпілотного літального апарату має ширший діапазон потенційних користувачів.

Система складається з визначеної кількості складових модулів, які представляють собою функціональні блоки, що надає перевагу у транспортуванні та зручності ремонту чи налаштування. Також завдяки модульності існує можливість реалізувати принцип взаємозамінності.

5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

У даному розділі буде проведено аудит технології, у даному випадку технології виконання системи безпілотного літального апарату, що включає особливості використання ядра системи, його програмування, використання вбудованих модулів та системи оцінки стану апарату.

Для проведення технологічного аудиту ідеї проєкту буде використано таблицю 5.4, у якій наведено існуючі технологічні можливості.

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту [21]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Використання власного контролера польоту на основі власного розробленого програмного забезпечення	Використання вільного програмного забезпечення контролера Використання базового вбудованого алгоритму керування двигунами Використання базового вбудованого алгоритму для вимірювальних систем Використання базового вбудованого алгоритму оцінки стану літального апарату	Наявні	Доступна
2.		Програмування мікроконтролера на основі існуючого алгоритму Використання базового програмного забезпечення для керування двигунами з проведенням налаштування Використання доступного алгоритму для вимірювальних систем	Наявні	Доступна

Продовження таблиці 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту [21]

	Використання власного контролера польоту на		Використання доступного алгоритму для оцінки стану літального апарату		
3.	основі власного розробленого програмного забезпечення		Побудова власного контролера польоту та програмного забезпечення для контролера Побудова алгоритму керування двигунами, проектування власної системи двигунів Побудова алгоритму для виконання вимірювання використовуючи визначений перелік необхідних модулів Побудова алгоритму для оцінки стану літального апарату, ємності акумулятора, стану датчиків та систем із надсиленням даних	Наявні	Доступна
		Обрана технологія реалізації ідеї проекту: використання технологій №3			

Проаналізувавши отриману таблицю можна зробити висновок, що найкращим варіантом буде використання технологій для ідеї проекту №3. Це обумовлено тим, що використання існуючих контролерів може обмежити його використання в межах доступних вимірювальних та виконавчих систем.

Використання базового алгоритму також може не завжди відповідати базовим вимогам та ідеям проєкту, а знайти підходящий є майже неможливим завданням. Більшість алгоритмів, які використовуються у системах літальних апаратів неможливо модифікувати, або це є технічно неможливим, або заборонено розробником.

Використання власного контролера може допомогти зняти такі обмеження, але такий підхід потребує проведення технічних робіт проектування та пошуку найкращих та оптимізованих рішень. Також таким чином можна буде впровадити самостійно обраний вимірювальний пристрій, зокрема розглянутий у проєкті трикоординатний гравіметр, акселерометр, гіроскоп, висотомір, контролер двигунів та інші апаратні складові.

Таблиця 5.5. Морфологічна карта [21]

Функції	Проміжні рішення		
	1-ше	2-ге	3-тє
Використання чутливого елемента	П'єзоелектричний	Струнний	Ємнісний
Використання ЕОМ	STM32	Raspberry Pi	Teensy

Також існує необхідність написання власного програмного забезпечення за власним технічним баченням, що також потребує пошуку найоптимальнішого алгоритму та оптимізації вже наявних. Але використання власного алгоритму допомагає уникнути проблем з необхідністю модифікації, оновлення, підтримки чи загальної переорганізації програмного коду.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У цьому розділі буде визначено ринкові можливості, які можна використовувати у процесі ринкового впровадження проєкту. Також буде описано ринкові загрози, що можуть вплинути або перешкодити реалізації даного проєкту.

Це надає можливості узагальнено оцінити сферу, визначити основні потенційні складнощі, щоб уникнути можливих проблем або мінімізувати їх вплив на реалізацію стартап проекту. Аналіз потенційного ринку стартап проекту представлено у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [21]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція популярних зарубіжних компаній
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або ринку), %	30

Надана характеристика відображає, що для обраної галузі відсутні особливі вимоги щодо стандартизації чи сертифікації, та відсутні обмеження окрім впливу та постійного зростання конкуренції, зокрема щодо зарубіжних компаній.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, а також виконуємо формування орієнтовного переліку вимог до товару відносно кожної обраної групи. Усі отримані дані заносимо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту [21]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
1	Створення пристрою що забезпечить стабільну фото- та відеозйомку в повітрі	Військові Власники камер Відеоблогери	Використання системи для отримання якісних фото- та відеоматеріалів, зокрема для військових чи невійськових цілей залежно від аудиторії	Висока стабільність та надійність, забезпечення стабілізації, міцність, підтримка різних камер
2	Дослідження поверхні землі вимірювальними системами	Науковці Дослідники	Використання системи для здійснення вимірювань різного характеру, що дозволяє виявляти певні особливості на поверхні землі та в верхніх її шарах тощо	Висока стабільність та надійність системи та вимірювальних приладів
3	Аеророзвідка	Військові Дослідники	Використання системи для ведення зйомки або перегляду зображення у режимі реального часу	Висока стабільність та надійність, підтримка FPV, наявність системи запису та зберігання даних

Підсумовуючи дані з таблиці можна зазначити, що існує достатня кількість потенційних клієнтів різного типу, які потребують такої системи для різного цільового призначення. Вимоги кожної розглянутої групи можуть бути задоволені цією системою що пропонується у даному стартап-проєкту. Але варто зазначити, що описані сфери використання можуть бути розширені шляхом

модифікації або доповнення системи, що розширить аудиторії потенційних користувачів.

Таблиця 5.8. Портрет цільового покупця [21]

Що хочуть купити	Безпілотний літальний апарат
Хто покупець	Фізичні особи, військові, підприємці
Мета купівлі	Забезпечення стабільної фото- та відео- зйомки
Коли покупець купує продукт	Коли необхідно забезпечити кращий рівень роботи та якість зйомки
Де покупець бажає придбати продукт	В соціальній мережі, в інтернеті
Мета стартапу	Задовільнити потребу в якісних БпЛА з низькою ціновою категорією

Наступним етапом розглянемо потенційні фактори загроз.

Таблиця 5.9. Фактори загроз [21]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція з міжнародними популярними компаніями	Зменшення кількості продажів	Виконання удосконалення пристрої до вищого рівня, оптимізація для зменшення вартості
2	Швидке «моральне старіння»	Динамічність розвитку технологій швидко вносить нові функції та можливості роблячи інші рішення не актуальними	Пошук нових інноваційних підходів та пропозицій для користувачів. Впровадження актуального функціоналу та технологій
3	Обслуговування та пошкодження	Вихід з ладу системи або окремих її модулів. Іноді в критичні ситуації	Організувати систему на базі модулів, які можна зняти та замінити маючи запасний. Надати послуги з ремонту та обслуговування

Продовження таблиці 5.9. Фактори загроз [21]

4	Взаємозамінність елементів	Необхідність замінити один модуль системи на інший новіший або для виправлення несправності	Система може містити легкі інтерфейси для підключення модулів, датчиків, виконавчих елементів, акумулятора. Модульний підхід дозволить виконувати ці процеси дуже легко
5	Зростання вартості комплектуючих та напівпровідникових компонентів	Зростання вартості комплектуючих призводить до значного подорожчання системи і це знизить продажі	Пошук засобів оптимізації задля зменшення вартості за рахунок організації системи та її особливостей. Пошук аналогічних та функціоналом та якістю компонентів з меншою вартістю

Аналізуючи отриманий перелік ризиків можна сказати, що існують певні фактори які здатні негативно вплинути на розвиток стартап-проєкту та вихід його на ринок, зокрема це зростання конкуренції, вартості комплектуючих, падіння актуальності. Є необхідність регулярного моніторингу та аналізу сфери для прогнозування потенційних загроз та їх виникнення, щоб вчасно вжити відповідних заходів.

Наступним етапом розглянемо фактори потенційних можливостей, та сформуємо отримані результати у вигляді таблиці 5.10.

Таблиця 5.10. Фактори можливостей [21]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Впровадження інноваційного функціоналу	Адаптація системи під сучасні тенденції та потреби користувачі	Впровадження нових функціональних системи, модулів та програмного забезпечення
2	Технічний аспект	Організація нового технологічного підходу або методів до виробництва, проектування або системи у цілому, що надає переваги серед конкурентів	Впровадження нових підходів, технологічних методів та засобів для покращення процесу виробництва. Як результат зменшення собівартості та розширення сфери потенційного застосування
3	Зростання попиту на систему	Зростання попиту впливає на прибуток та на можливість збільшення обсягів виробництва	Впровадження нових методів виробництва. Розширення спільноти
4	Розширення на міжнародні ринки	Зростання популярності впливає на можливості розширення на міжнародні ринки	Впровадження новітніх технологій у сфері для створення конкурентного засобу з відносно низькою вартістю
5	Інноваційні технології	Покращення якості і функціональності	Використання функціональніших модулів та апаратних елементів

Можна зазначити, що існує перелік факторів який має потенціал для позитивного впливу та можливостей розвитку стартап-проєкту. Використання інноваційних та технологічно досконалих підходів до проектування, виробництва, вибору комплектуючих дозволяє виготовляти унікальний товар з особливою функціональністю. Це у свою чергу впливає на популярність та поширеність використання системи.

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

Таблиця 5.11. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [21]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Чиста конкуренція	Окремі компанії не мають здатності впливати на ціну	Використання підходу зниження ціни шлях оптимізації
Глобальний рівень конкурентної боротьби	Наявність клієнтів та спілок в інших країнах	Покращення методів, підходів та функціональних можливостей
Конкуренція за галузевою ознакою (внутрішньогалузева)	Має актуальність у заданій (одній) галузі	Впровадження унікального функціональна. Стабільна підтримка існуючих засобів
Конкуренція за видами товарів (товарно видова)	Конкуренція, яка виникає між товарами одного виду	Адаптація під сучасні вимоги та тенденції
За характером конкурентних переваг (нецінова)	Залежить від особливостей, функціоналу та методів	Оптимізації для зростання якості систем та їх роботи
За інтенсивністю (марочна)	Марка має можливість впливати на покупця. Створення бренду	Реєстрація марки, реклама. Концепція якості-ціни-функціональності

У підсумку можна сказати, що конкуренція на даний момент часу представлена у вигляді окремої кількості виробників, які надають аналогічні продукти не гіршої якості. Існує потреба у постійному пошуку та впровадженню інноваційних функцій. Існує також наявність клієнтів у різних країнах, що створює конкуренцію на зовнішніх ринках. Конкуренція є товарно-видовою, так як вона представлена у певні видовій категорії, що звужує дану сферу. Є необхідність стабільної підтримки існуючих засобів, зокрема щодо програмного та апаратного забезпечення. Також важливо слідкувати за сучасними тенденціями, що повинно передбачати пошук та впровадження унікального функціоналу першим серед конкурентів.

Важливим питанням також залишається реєстрація торгової марки та власного бренду, так як це вплине на впізнаваність системи серед інших, та виділення її особливостей.

Після виконання аналізу конкуренції виконаємо детальніший аналіз умов конкуренції у галузі. Результати відображено у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12. Аналіз конкуренції у галузі за М. Портером [21]

Складові аналізу	Прямі конкуренти у галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	DJI	Наявність у них товарів-аналогів	Об'єм (розмір) замовлення (поставок)	Оцінка системи та програмного забезпечення.	Міжнародні компанії-виробники (масові)
	Autel				
	iFlight				
Висновки:	Середня інтенсивність конкуренції	Є можливість виходу на ринок за рахунок оптимізації та технологічних новинок	Постачальники здатні регулювати цінову категорію	Формують попит та конкретну потребу у функціоналі	Обмеження майже відсутні так як товар не є унікальним та високнадійним

Узагальнюючи можна зазначити що основними факторами які можуть здійснювати певний безпосередній вплив на стартап-проект це постачальники та відповідно користувачі системи.

Постачальники здатні в міру необхідності, зокрема враховуючи економічну ситуацію, як зменшувати вартість комплектуючих так і знижувати, що створює певну нестабільність. Користувачі є прямими споживачами товару і вони формують загальну рецензію на товар, яка здатна поширювати через різні джерела, що у випадку несправностей, технічних проблем чи функціональності може мати як позитивні так і негативні реакції, а це в свою чергу сильно зашкодить розвитку проекту.

Після виконання даного аналізу необхідно перейти до обґрунтування переліку факторів забезпечення конкурентоспроможності проєкту. Конкурентоспроможність є одним із основних аспектів який здатен визначати можливість розвитку та існування стартапу у цілому, а також дозволяє визначити методи її покращення. Результати наведено у таблиці 5.13.

Таблиця 5.13. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [21]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Універсальність	Система може використовуватися за різним призначення у галузі
2	Слідкування за сучасними тенденціями	Врахування сучасних вимог та потреб, а також тенденцій розвитку різних сфер де підвищена зацікавленість у таких системах є важливим показником для клієнтів
3	Постійний розвиток та покращення	Пошук нових покращень та оновлення забезпечують стабільну роботу пристроїв та функціональні можливості
4	Підтримка та обслуговування засобів	Надається підтримка засобів (технічна, програмна та консультативна)
5	Забезпечення оптимальної якості	Забезпечення якості є одним із ключових факторів що визначає майбутній вибір клієнта
6	Гарантійні зобов'язання	Надається гарантія (термін може залежати від типу системи)

Визначивши основний перелік факторів конкурентоспроможності системи стартап-проєкту переходимо до виконання порівняльного аналізу сильних та слабких сторін. Усі отримані дані описано у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «SkyFantom» [21]

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

У результаті проведення порівняльного аналізу факторів конкурентоспроможності визначено що основними перевагами стартап-проекту є його універсальність та слідування сучасним тенденціям та потребам клієнтів. Але також на даний момент існують недоліку, зокрема це пов'язано з доступними засобами щодо забезпечення підтримки та обслуговування, зокрема технічного, а також в певній мірі забезпечення безперебійного постійного розвитку та покращень у системі та програмному забезпеченні.

Наступним етапом побудуємо таблицю SWOT-аналізу (табл. 5.15). Виконання цього аналізу є одним із складових етапів для ринкового аналізу сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз.

Даний аналіз виконується на основі даних попередніх таблиць, щодо розгляду даних параметрів та аспектів.

Таблиця 5.15. SWOT- аналіз стартап-проєкту [21]

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Відносно недорога вартість; 2. Універсальність; 3. Слідування сучасним тенденціям 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Посередня складність технології; 2. Постійно стабільний розвиток та покращення; 3. Підтримка та обслуговування засобів
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Впровадження інноваційного функціоналу; 2. Технічний аспект систем; 3. Зростання попиту на систему; 4. Розширення на міжнародні ринки; 5. Інноваційні технології згідно тенденцій 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Конкуренція з міжнародними популярними компаніями; 2. Швидко «моральне старінні» продукту; 3. Обслуговування та пошкодження; 4. Взаємозамінність елементів; 5. Зростання вартості комплектуючих та напівпровідникових компонентів

У результаті виконання SWOT- аналіз стартап-проєкту отримано узагальнену таблицю. На основі даної таблиці можна провести визначення альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту. Дані результати заносяться до таблиці 5.16.

Таблиця 5.16. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту[21]

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

Виконавши аналіз альтернатив впровадження стартап-проекту обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями. Варто зауважити, що використання нових підходів до систем з урахуванням тенденції впливає на сприйняття товару споживачами. Вони можуть мати показники, які будуть схожі на показники аналогів, але пропонуватимуть унікальні можливості, наприклад у функціональному аспекті.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

У процесі розроблення ринкової стратегії початковим етапом є визначення стратегії охоплення ринку. Зокрема описуються цільові групи потенційних споживачів.

Таблиця 5.17. Вибір цільових груп потенційних споживачів [21]

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові компанії	Так	Середня	Середня	Просто

Продовження таблиці 5.17. Вибір цільових груп потенційних споживачів

2	Фізичні особи	Так	Високий	Висока	Середня
3	Наукові/дослідницькі організації	Ні	Середній	Середня	Просто
4	Військові групи	Так	Високий	Висока	Просто
Як цільові групи обрано: промислові компанії та військові групи					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано цільові групи, які включають певні промислові компанії, також військові, де попит на такого роду системи дуже сильно зростає та потребує нових рішень за відносно низьку ціну.

Для того, щоб здійснювати роботу в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 5.18).

Таблиця 5.18. Визначення базової стратегії розвитку [21]

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

Стратегією охоплення ринку було обрано недиференційований маркетинг, що дозволить зосередитися на базових характеристиках продукту. Базовою стратегією розвитку бути обрано стратегію диференціації тому, що вона є підходящою для проєктів або компаній які прагнуть створювати та надавати унікальний та оригінальний продукт.

Наступним етапом опишемо вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.19)

Таблиця 5.19. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [21]

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Забирати існуючих	Частково. Що обумовлено специфікою систем. До них відноситься: - метрологічні характеристики - принцип дії - технічні підходи - апаратні компоненти	Стратегія заняття конкурентної ніші

Компанія має певну специфіку щодо часткового копіювання характеристик аналогічних чи подібних систем. Це обумовлено тим, що є перелік основних технічних характеристик які є подібними або аналогічними, також це обумовлюється апаратними складовими. У якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію заняття конкурентної ніші, так як це дозволить демонструвати перевагу власного проєкту серед аналогів.

На основі вимог споживачів відповідно до обраного сегменту до постачальника і продукту, а також у залежності від обраних стратегій розвитку та конкурентної поведінки здійснюємо розробку стратегії позиціонування (табл. 5.20), яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають здійснювати ідентифікацію проєкту.

Таблиця 5.20. Визначення стратегії позиціонування [21]

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Забезпечення високої якості, стабільності роботи та подальшої підтримки з вдосконаленням	Стратегія диференціації	Відносно недорогога вартість за достатньо високу функціональність. Універсальність застосування. Слідування сучасним вимогам та тенденціям з систематичними оновленнями.	Ціна. Технологічна досконалість. Висока функціональність.

У результаті виконання даної частини розділу було сформульовано та отримано систему рішень, щодо ринкової поведінки компанії. Вона визначає у якому напрямку буде працювати та розвиватися компанії на ринку.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

У процесі розробки маркетингової програми першим етапом є розробка маркетингової концепції товару, який отримає користувач, у даному випадку системи безпілотного літального апарату. У таблиці 5.21 виконуємо підсумування результатів аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.21. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [21]

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Забезпечення універсальності використання	Забезпечення використання системи для різних цілей з можливістю простої заміни модулів	Використання модульного підходу до організації структури забезпечує універсальність застосування шлях заміни модулів або доповнення
2	Доступна цінова категорія та хороша якість	Використовуючи технічні та технологічні підходи до оптимізації системи досягається баланс у вартості та якості	Використовують усі можливі доступні засоби оптимізації, що дозволить економити витрати на виробництві та зменшити остаточну вартість
3	Засіб з підтримкою FPV	Систему можна адаптувати під використання у якості FPV безпілотного літального апарату	Система може бути адаптованою під використання у якості FPV

Описані ключові переваги надають продукту потенціал для розвитку на ринку а обраній ніші. Ці переваги є важливими, так як певні з них, зокрема модульність, не підтримується у більшості аналогічних рішеннях. Також це надає можливість адаптувати чи модифікувати систему під необхідне цільове призначення без особливих витрат.

Наступним етапом варто розглянути та побудувати таблицю опису трьох рівнів моделі товару (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. Опис трьох рівнів моделі товару [21]

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Універсальний, модульний безпілотний літальний апарат, низької/середньої цінової категорії з оптимальними показниками якості та надійності		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Ор
	1. Універсальність	М	Тх
	2. Технологічність	М	Тл
	3. Надійність	М	Тх
	4. Модульність	М	Тх
	5. Економічність	М	Е
	Якість: IP67		
	Пакування: картонне пакування з захисним ущільнювачем, нанесена захисна плівка		
Марка: FlyFantomProject			
III. Товар з підкріпленням	До продажу: усунення потенційно можливих проблем, перевірка працездатності модулів та системи в цілому		
	Після продажу: надання послуг обслуговування та консультації, гарантійні зобов'язання		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Було описано три рівня моделі товару стратап-проєкту. Було визначено товар за задумом та у реальному виконанні, відповідно товар відповідає задуманим характеристикам. Описані властивості, зокрема модульність та універсальність, роблять систему унікальною серед аналогів. Варто зазначити, що розробка потребує захисту від незаконного копіювання, наприклад відповідним патентом.

Наступний етап включає у собі визначення меж встановлення ціни, що відображено у відповідній таблиці 5.23.

Таблиця 5.23. Визначення меж встановлення ціни [21]

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	15 - 25 тис. грн.	30 - 100 тис. грн.	10-100 тис. грн.	20-35 тис. грн.

Для даної системи обрано середній ціновий сегмент, щоб мати можливість надавати якісний продукт і дотримуватися умов щодо оптимальних цінових категорій.

Таблиця 5.24. Календарний план-графік підготовки стартап-проєкту [21]

Стадія стартапу	Період запуску (за місяцями з початку підготовки проєкту)					Вартість стадії, грн
	1	2	3	4	5	
Передпосівна	20.12.23 20.01.24					-
Посівна		20.01.24 20.02.24				15000
Прототипування			20.02.24 10.04.24			100000
Закрита бета-версія				10.04.24 10.05.24		150000
Ведення бізнесу					з 10.05.24	250000
Разом						515000

Після завершення визначення меж встановлення цін варто описати формування системи збуту, та відобразити це у таблиці (5.25).

Таблиця 5.25. Формування системи збуту [21]

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Придбання у малій та середній кількості	Дотримання наданих гарантійних зобов'язань, дотримання умов зберігання товару та транспортування	Нульового рівня	Пряма

Відповідно отриманій таблиці формування системи збуту маємо продаж товарів у малій та середній кількості товару, що є поширеним для галузі, глибина каналу нульового рівня а оптимальна система збуту пряма. На основі цих даних виробник являється безпосереднім продавцем на надавачем послуг щодо обслуговування та підтримки користувачі.

Останнім етапом у даному підрозділі є опис концепції маркетингових комунікацій (табл. 5.26).

Таблиця 5.26. Концепція маркетингових комунікацій [21]

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Потребують стабільної та надійної роботи літального апарату незалежно від режиму. Мають необхідність адаптувати систему під різні ситуації. Потребують швидкої та легкої взаємозаміни комплектуючих за рахунок модульності	Інтернет, фахові видання, інтернет статті, соціальні мережі, відеохостинги	Ціна. Технологічна досконалість. Висока функціональність	Продемонструвати переваги використання даної системи перед поширеними аналогічними для забезпечення економії та відповідної якості	Реклама модульного підходу та основних функцій системи

Дані табл. 5.27 представляють собою програму, яка містить у собі інформацію, щодо специфіки аудиторії, ключових каналів комунікації, виділено основні аспекти позиціонування, а також завдання та концепцію рекламного звернення. Ця інформація у загальній сукупності корисна для представлення загального бачення щодо просування даного стартап-проєкту серед зацікавлених осіб через актуальні канали зв'язку.

У наступні таблиці визначимо перелік витрат на запуск стартапу та визначимо вартість кожного з зазначених етапів.

Таблиця 5.27. Початкові вкладення на запуск стартап-проєкту [21]

Види витрат	Вартість
НДДКР	5000
Захист прав на об'єкти інтелектуальної власності	10000
Створення робочого прототипу, проведення експериментальних досліджень	30000
Просування проєкту	50000
Витрати на утримання команди	30000
Закупівля обладнання	60000
Орієнтована собівартість першого продукту	15000
РАЗОМ	200000
Витрати які бере на себе стартапер	60000
Необхідні інвестиції	140000

У підсумку до отриманої таблиці можна сказати, що для виконання переліку цілей є необхідним отримання інвестицій у розмірі 140000 грн.

Розглянемо питання планових фінансово-економічних показників стартап-проєкту. Ці показники варто оцінити, так як вони необхідні для того щоб орієнтовно оцінити прибутки за рік.

Таблиця 5.28. Планові фінансово-економічні показники [21]

	Показник	Періоди (по місяцях)												Всього за рік
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Обсяг виробництва продукції в натуральних показниках	5	5	6	6	7	7	8	9	10	12	14	16	105
2	Собівартість одиниці продукції, тис. грн	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	180
3	Собівартість виробництва продукції, тис. грн.	75	75	90	90	105	105	120	135	150	180	210	240	1,575
4	Обсяг реалізації продукції в натуральних показниках	5	5	6	6	7	7	8	9	10	12	14	16	105
5	Ціна реалізації продукції без ПДВ, тис.грн.	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	300
6	Виручка від реалізації продукції без ПДВ, тис.грн.	125	125	150	150	175	175	200	225	250	300	350	400	2,275
7	Податок на додану Вартість (ПДВ), тис.грн.	5	5	6	6	7	7	8	9	10	12	14	16	105
8	Валовий прибуток	50	50	60	60	70	70	80	90	100	120	140	160	700
9	Податок на прибуток 20 %	10	10	12	12	14	14	16	18	20	24	28	32	210
10	Чистий прибуток	40	40	48	48	56	56	64	72	80	96	102	128	490

Згідно з цієї таблицею можна зазначити, що при виробництві 105 систем БПЛА, собівартість 15 тис. грн і з ціною в 25 тис. грн, виручка складе 2,275 тис. грн, а чистий прибуток становитиме 490 тис. грн. Цей розрахунок виконано на один рік.

5.6. Висновки до розділу 5

Даний розділ присвячено розробці та детальному опису стартап-проєкту для розробленої системи безпілотного літального апарату та бази трикоординатного чутливого елемента.

У процесі виконання маркетингового аналізу стартап-проєкту було визначено основну концепцію проєкту та його особливості. Варто зазначити що важливим аспектом, від якого залежить ефективність реалізації даного проєкту це питання інновації, ідеї, вибору команди та фінансування.

Проведено аналіз потенційної групи споживачів, які можуть зацікавитися продуктом. Проєкт має достатньо хорошу рентабельність. Сформовано перелік потенційних слабких та сильних сторін, які можуть вплинути на подальший розвиток та життєздатність стартапу.

Виконано технологічний аудит, завдяки чому визначено потенціал даного проєкту, його інноваційні складові, які полягають у забезпеченні високої універсальності за рахунок модульності будови апарату та принципу взаємозамінності. Такий підхід забезпечить зростання популярності. Важливим моментом, якого варто дотримуватися, є баланс між універсальністю, якістю і ціновою категорією.

Важливим елементом залишається підлаштування під бажання споживачів, для того щоб створювати унікальний продукт з врахування сучасних тенденцій та розвитку сфер застосування безпілотних літальних апаратів. Аналіз ключових каналів комунікації та питання реклами також посідає вагомe місце, так як правильне позиціонування товару чи послуги є тим що зацікавлює

потенційного клієнта та надає йому бажання переглянути пропозицію детальніше.

Стартап-проект є потенційно перспективним для низки галузей, та може мати попит, навіть якщо врахувати певну конкуренцію серед сегменту. Основними питаннями залишається стабільна підтримка, оптимізація та пошук нових рішень, а також фінансове забезпечення.

ВИСНОВКИ

Проведені у дисертації дослідження та опис трикоординатного п'єзоелектричного гравіметра, дозволять розширити уявлення про застосування високоточних чутливих елементів, а також їх значення для забезпечення автономної роботи автоматизованої системи керування БпЛА.

Основний перелік розглянутих матеріалів можна описати наступним чином:

1) надано загальний огляд систем автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами. Описано особливості процесів автоматизації, принцип автономності, загальні характеристики таких систем та класифікації;

2) надано вичерпний опис трикоординатних чутливих елементів, їх особливостей, характеристик, різновидів та методів використання. Розглянуто перелік методів та засобів вимірювання ПСТ. Описано принцип дії трикоординатного п'єзогравіметра та його напрямів його застосування за призначенням;

3) описано математичну модель розглянутого п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої системи керування. Надано вичерпний опис математичного і фізичного принципу роботи;

4) надано практичні та експериментальні відомості щодо автоматизації вимірювання з використанням трикоординатного чутливого елементу. Розроблено базову програму для виконання вимірювання з використанням мікроконтролера. Надано дані щодо точності роботи п'єзогравіметра при дії вібрацій, розглянуто вплив резонансних частот. Описано метрологічні характеристики;

5) розроблено стартап-проект у якому описано та обгрунтовано можливості побудови стартапу на основі даної розробки. Результатом розділу є надання вичерпних даних щодо потенційних можливостей, загроз, конкурентоспроможності та подальших перспектив такого проекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1) Романюк Л.А., Чихіра І.В. Автоматизована система управління повітряним рухом безпілотного літального апарату. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2020. Т.31 (70), Ч.1, № 3. С. 131-135. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/21> (дата звернення: 25.09.2023);

2) Міністерство оборони України. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України. Наказ z0031-17 від 08.12.2016, № 661. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text>. (дата звернення: 26.09.2023);

3) Becerra, V. M. (2019). Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicles. Electronics, 8. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics8040452>. (дата звернення: 26.09.2023);

4) Alkowitz, M.T.; Becerra, V.M.; Holderbaum, W. Bioinspired Autonomous Visual Vertical Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. J. Guid. Control. Dyn. 2014, 38, 249-262. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.G000634>. (дата звернення: 26.09.2023);

5) Безвесільна О.М., Назаренко А.О. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої гравіметричної системи. Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці: тези доповідей учасників Всеукраїнської науково-практичної онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих (20-21 травня 2023 р.). Житомир: ЖНАЕУ, 2023. С. 110. (дата звернення: 10.10.2023);

6) Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Л.О. Чепюк, К.С. Козько // Геофизический журнал. - 2015. - Т. 37, № 2. - С. 86-94. - Бібліогр.: 16 назв. - укр. DOI: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111309>. (дата звернення: 10.10.2023);

7) Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Нечай С.О., Назаренко А.О. Трикоординатний чутливий елемент автоматизованої системи керування.

Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці: тези доповідей учасників Всеукраїнської науково-практичної онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (Житомир, 20-21 травня 2023 р.). Житомир: ЖНАЕУ, 2023. С. 111-112. (дата звернення: 10.10.2023);

8) Л.О. Чепюк. Струнний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Технологічний аудит і резерви виробництва (Технологический аудит и резервы производства). 2012. №6/4(8). С.23-24. (дата звернення: 12.10.2023);

9) Безвесільна О.М. Двокомпонентний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої гравіметричної системи. Монографія. - ДП «Редакція інформаційного бюлетеня» Офіційний вісник Президента України». Київ, з грифом КПІ ім. Ігоря Сікорського: Київ. 2020 - 250 с. (08.11.2023);

10) Високоточний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, М.А. Войцицький // Геофизический журнал. - 2015. - Т. 37, № 4. - С. 139-144. - Бібліогр.: 12 назв. - укр. (дата звернення 08.11.2023);

11) Безвесільна, О.М., Чепюк, Л.О. Аналіз основних типів гравіметрів АГС. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки; 3(66). 2013. С. 52 - 61. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/2480>. (дата звернення 09.11.2023);

12) Ткачук А. Г. П'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи.- Дис. канд. техн. наук: 05.11.01, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2014.- 240 с.;

13) Безвесільна, О. М. Вимірювання прискорень [Текст] / О. М. Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 261 с.;

14) Безвесільна, О. М. Вимірювання гравітаційних прискорень [Текст] / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 264 с.;

15) Нічик, В. Ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотного літального апарату / В. Нічик, О. М. Безвесільна, С. О. Нечай // XIII Науково-практична конференція студентів,

аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 144-148. – Бібліогр.: 3 назви.;

16) Безвесільна, О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри [Текст]: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.;

17) Безвесільна, О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів [Текст]: підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – 812 с.;

18) Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В., Бичук Р.В. Патент «Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи» а 2015 09858 Бюл. №22 від 25.11.2016 по заявці а 2015 09858 Бюл. №7 від 11.04.2016.;

19) Безвесільна О. М. Перетворювальні пристрої приладів / О. М. Безвесільна, П.М. Таланчук – К. : ІСДО, 1994. – 448 с.;

20) Безвесільна О.М. Структурна схема перетворення вхідного сигналу чутливим елементом п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи / О. М. Безвесільна, А.Г. Ткачук // Міжнар. наук. журнал «Технологічні комплекси». – 2013. – № 1(7). – С. 43–50.;

21) 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.