

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій КИРИЧУК**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ**

**на здобуття ступеня бакалавру**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології**  
**проектування приладів»**

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

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

Виконав:

студент 4-го курсу, групи ПМ-91

Бегов Антон Андрійович \_\_\_\_\_

Керівник:

Професор, д. т. н. АСНК

Безвесільна О.М. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор д.т.н. ІВТ,

Володарський Євген Тимофійович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1			Завдання на дипломний проєкт		
2	A4	ДПБ.ПМ-91.02.1760.001.ПЗ	Пояснювальна записка	84	
3	A1	ДПБ.ПМ-91.02.1760.001.СК	Складальний кресленик	1	Схема вібростенду
4	A1	ДПБ.ПМ-91.02.1760.002	Принципова схема	1	Випробування на вібростенді
5	A1	ДПБ.ПМ-91.02.1760.003	Схема ілюстративна	1	3-D модель акселерометра
6	A2	ДПБ.ПМ-91.02.1760.004	Схема ілюстративна	1	Схема контактів
7	A2	ДПБ.ПМ-91.02.1760.005	Схема ілюстративна	1	Схема розводки контактів
8	A2	ДПБ.ПМ-91.02.1760.006	Принципова схема	1	Чутливий елемент
9	A2	ДПБ.ПМ-91.02.1760.007	Схема ілюстративна	1	Габаритні розміри ЧЕ
10	A4	ДПБ.ПМ-91.02.1760.008	Специфікація	2	

				<b>ДПБ.ПМ-91.02.1760.001.ПЗ</b>		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Бегов А.А.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Безвесільна О.М.					
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-91	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.					

# Пояснювальна записка

До дипломного проекту

На тему «Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації»

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)  
Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**На дипломний проєкт студенту**

**Бєгову Антону Андрійовичу**

1. Тема проєкту «Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації», керівник роботи Безвесільна Олена Миколаївна д.т.н. , проф. , затвержені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057-с
2. Термін подання студентом проєкту 15 червня 2023
3. Вихідні дані до проєкту: робочий частотний діапазон 1-8 кГц, ; інерційна маса до 0,04 кг, площа поверхні пластини  $S = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , середовище між обкладками ЄП — вакуум, ; інерційна маса до 0,05 кг,, тип конструкції ЧЕ – ємнісний елемент.
4. Термін подання студентом проєкту 15 червня;
5. Зміст пояснювальної записки: Перелік позначень та скорочень; Вступ; Проектно-аналітичний розділ; Огляд літературних відомостей; Порівняння сучасних ємнісних гравіметрів; Опис принципу роботи; огляд конструкції ЄГ; принцип дії ємнісного МЕМС гравіметра; Основні компоненти ємнісних гравіметрів; Різновиди корпусів ЄГ; Математична модель та аналіз основних похибок ємнісного чутливого елемента; Рівняння руху ДЄГ; Функціональна схема навігаційного комплексу; Структурна схема ДЄГ; Конструкція ємнісного ДЄГ автоматизованого НК; основні параметри МЕМС гравіметра; Класифікація

та аналіз похибок МЕМС гравіметра; Автоматизована система стабілізації;  
Висновок до дипломного проєкту; список використаних джерел.

6. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

7. Консультанти розділів проєкту\*

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

8. Дата видачі завдання 14 лютого 2023р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Одержання затверженого завдання до дипломного проєкту	14.02.2023	
2	Огляд і аналіз сучасних безпілотних літальних апаратів, огляд конструкції та класифікації.	15.02.2023 28.02.2023	
3	Огляд сучасних авіаційних гравіметрів та порівняння	01.03.2023 15.03.2023	
4	Опис принципу роботи ємнісного чутливого елемента, огляд конструкції, різновидів корпусів ємнісного гравіметра.	16.03.2023 31.03.2023	
5	Рівняння руху двоканального ємнісного гравіметра, розробка математичної моделі та аналіз основних похибок	01.04.2023 15.04.2023	
6	Структурна схема ДЄГ та опис конструкції ємнісного ДЄГ автоматизованого НК. Функціональна схема навігаційного комплексу	16.04.2023 30.04.2023	
7	Експериментальне дослідження двоканального ємнісного гравіметра. Опис випробувальної установки	01.05.2023 09.05.2023	
8	Автоматизована система стабілізації з використанням ємнісного чутливого елемента	10.05.2023 24.05.2023	
9	Оформлення графічного матеріалу	25.05.2023 31.05.2023	
10	Висновок та оформлення пояснювальної записки	01.06.2023 07.06.2023	

Студент

А.А. Бегов

Керівник

О.М. Безвесільна

Київ 2023

## РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить: 84 сторінок, 7 табл. , 32 рис. , та 31 джерел

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) інтенсивно набирають популярність у багатьох країнах світу. Головною причиною застосування безпілотних літальних апаратів є зменшення людських та економічних втрат, особливо при використанні у військовій сфері. БПЛА мають широкий спектр застосування.

Застосування військових БПЛА:

- Ведення тактичної та стратегічної розвідки;
- Нанесення ударів та перехоплення повітряних цілей;
- Виявлення вибухонебезпечних об'єктів та інші.

Застосування БПЛА у цивільній сфері:

- Радіаційну, біологічну та хімічну розвідки;
- Пошук та рятування;
- Моніторинг у важкодоступних районах;
- Ретрансляція зв'язку та інші.

За ступенем автономності БПЛА можуть бути повністю автоматичні або ж керовані дистанційно. Виникає проблема у автоматизованому управлінні та стабілізації безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі.

Для забезпечення стійкості руху та підвищення безпеки польоту БПЛА потрібно створити автоматизовану систему управління. Значну увагу слід приділити системі орієнтації та стабілізації. В даній роботі чутливим елементом для стабілізації буде розглянуто чутливий елемент прилад для вимірювання прискорення сили тяжіння, двоканальний ємнісний MEMS чутливий елемент.

Ключові слова: ємнісний MEMS чутливий елемент.

## ABSTRACT

Contains: 84 pages, 7 tables, 32 figures and 31 sources

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) are rapidly gaining popularity in many countries of the world. The main reason for the use of unmanned aerial vehicles is to reduce human and economic losses, especially when used in the military sphere. UAVs have a wide range of applications.

Application of military UAVs:

- Conducting tactical and strategic intelligence;
- Striking and intercepting air targets;
- Detection of explosive objects, etc.

Application of UAVs in the civil sphere:

- Radiation, biological and chemical intelligence;
- Search and rescue;
- Monitoring in hard-to-reach areas;
- Communication relay, etc.

Modern UAVs are difficult to classify within the framework of some parameters, by range, duration of flight, design and other parameters.

According to the degree of autonomy, UAVs can be fully automatic or remotely controlled. There is a problem in the automated control and stabilization of UAVs in the air space.

To ensure the stability of movement and increase the safety of UAV flight, it is necessary to create an automated control system. Considerable attention should be paid to the orientation and stabilization system. In this work, a sensitive element for stabilization will be considered a sensitive element, a device for measuring the acceleration of gravity, a two-channel capacitive MEMS sensitive element.

Keywords: capacitive MEMS sensitive element.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ (БПЛА).....	15
1.1 Класифікація БПЛА.....	16
1.2 Конструкція БПЛА.....	18
1.3 Військові БПЛА.....	21
1.4 Комерційні БПЛА.....	24
1.5 Висновок до першого розділу.....	27
РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗОВАНИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС (БПЛА).....	28
2.1 Принцип роботи навігаційного комплексу.....	28
2.2 Основні типи вимірювання ПСТ.....	28
2.3 Основні методи вимірювання прискорення.....	29
2.4 Висновок до другого розділу.....	32
РОЗДІЛ 3. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГРАВИМЕТРІВ. ВИДИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ.....	33
3.1 Струнний Гравіметр СГ.....	33
3.2 П'єзоелектричний Гравіметр.....	34
3.3 Гіроскопічний гравіметр.....	35
3.4 Ємнісний гравіметр ЄГ.....	37
3.5 Порівняльна характеристика існуючих типів гравіметрів.....	38
3.6 Висновок до третього розділу.....	40
РОЗДІЛ 4. ЄМНІСНІ МЕМС ГРАВИМЕТРИ.....	41
4.1 Конструкція ЄГ.....	41
4.2 Принцип дії ємнісного МЕМС гравіметра.....	43

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>	<i>Бегов</i>				<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірив.</i>	<i>Безвесільна</i>							84
<i>Н. контр.</i>					<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>			
<i>Затв.</i>								



4.3 Основні компоненти ємнісних МЕМС гравіметрів.....	46
4.4 Різновиди корпусів ЄГ.....	47
4.5 Види корпусів ЄГ.....	48
4.6 Висновок до четвертого розділу.....	49
РОЗДІЛ 5. ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ МЕМС ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПОХИБОК ЄМНІСНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА.....	
5.1 Рівняння руху ДЄГ.....	50
5.2 Функціональна схема навігаційного комплексу.....	55
5.3 Структурна схема ДЄГ.....	56
5.4 Конструкція ємнісного МЕМС чутливого елемента.....	59
5.5 Конструкція ємнісного диференціального МЕМС акселерометра.....	60
5.6 Ємнісний МЕМС ДЄГ автоматизованого НК.....	61
5.7 Основні параметри МЕМС гравіметра.....	62
5.8 Класифікація та аналіз похибок МЕМС гравіметрів.....	63
5.9 Висновок до п'ятого розділу.....	67
РОЗДІЛ 6. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА.....	
6.1 Автоматизована система стабілізації (СС).....	68
6.2 Висновок до шостого розділу.....	70
РОЗДІЛ 7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО ГРАВІМЕТРА.....	
7.1 Опис випробувальної установки.....	71
7.2 Досліджування двоканального ЄГ.....	72
7.3 Градууювальна характеристика двоканального ЄГ.....	72
7.4 Базові параметри роботи макету.....	74
7.5 Проведення експерименту ДЄГ.....	75

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бегов				<i>Пояснювальна записка</i>	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Безвесільна							84
Н. контр.					<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>			
Затв.								

7.6 Визначення метрологічних характеристик ДЄГ.....	78
Висновок до сьомого розділу.....	79
ВИСНОВОК.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Бегов</i>							84
<i>Перевірив.</i>	<i>Безвесільна</i>							
<i>Н. контр.</i>								
<i>Затв.</i>								
						<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

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

UAV - unmanned aerial vehicle

GPS – global positioning system

ГСП – гіростабілізована платформа

ЄГ – ємнісний гравіметр

ПСТ – прискорення сили тяжіння

АНК – автоматизований навігаційний комплекс

НК -навігаційний комплекс

СГ – струнний гравіметр

ДСГ – двоканальний ємнісний гравіметр

ПЕ – пружний елемент

ПГ – п'єзогравіметр

ЧЕ – чутливий елемент

$\Delta_g$  – аномалія прискорення сили тяжіння

$f_z$  – вихідний сигнал ПГ

$d_i$  – п'єзоелектричний модуль

$\Delta_g$  – аномалія прискорення сили тяжіння

$\dot{h}$  – вертикальне прискорення літального апарату

$g_z$  – проекція ПСТ на вісь чутливості ПГ

$\xi$  – коефіцієнт демпфування

$\omega_0$  – власна частота ПГ

$\gamma_0$  – довідкове значення ПСТ

						Арк
					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Використання безпілотних літальних апаратів значно збільшилися на 2023 рік. Сучасні БПЛА здатні передавати високу якість інформації та точні дані, здійснювати аерофотозйомку, відеозаписи, збирати розвідувальну інформацію, літати на великі висоті та передавати дані в реальному часі.

Порівняно з пілотними літальними апаратами, БПЛА мають ряд переваг, а саме:

- Функціонування без присутності пілота на борту, що дозволяє уникати ризику для життя. Також це зменшує час на підготовку пілотів та безпеки пілотів у виконанні військових операцій.
- Збільшення часу польоту за рахунок відсутності дозаправок та фізичних обмежень пілотів, що дає змогу робити тривалі спостереження та віддаленні зондування.
- Менші витрати на виготовлення таких безпілотних літальних апаратів, оскільки вони є менші за розміром та мають просту будову. Відносно невеликі затрати на обслуговування та ремонт. Менше використання палива.
- БПЛА за ступенем автономності дуже гнучкі, можуть бути повністю автоматичні без необхідності постійного керування або ж керовані дистанційно в реальному часі. Це дозволяє вести посилений контроль та ефективність виконання поставлених завдань.
- Менші ризики безпеки застосування при розвідці небезпечних територій та дослідженні радіоактивних зон.
- використання мікроелектромеханічних систем дає змогу мінімізувати розміри та зменшити вагу безпілотних літальних апаратів, зберігаючи та покращуючи їхні функціональні можливості, що робить їх доступними для застосування в різних цілях.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки швидкому розвитку технологій, інноваційним рішенням та використанню мікроелектромеханічних систем та оптичних компонентів, процес розробки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво прискорився в порівнянні з початком їх виникнення. Використання таких технологій та систем дозволяє створити легкі, компактні та ефективні системи, які забезпечують високу точність, стабільність та автономність.

Однією з найважливіших складових при розробці нового БПЛА є система стабілізації, яка складається з гіростабілізованих платформ (ГСП), важливим елементом в якій є чутливий елемент гравіметр. За допомогою гравіметра можна точно виміряти прискорення сили тяжіння  $g$  та **аномалію**  $\Delta g$ .

Традиційні гравіметричні методи вимагають тривалої обробки результатів протягом кількох місяців, і мають обмежену точність та швидкість. Це призвело до потреби розробки нових гравіметрів на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС), які виявляють великий потенціал.

Один з перспективних гравіметрів, який варто відзначити, є ємнісний одноканальний гравіметр (ЄГ). Проте, ЄГ має свої обмеження, пов'язані з похибками. Саме тому двоканальний ємнісний гравіметр на базі мікроелектромеханічних систем (ДЄГ) стає ще більш перспективним рішенням. ДЄГ дозволяє досягти вищої точності, завдяки усуненню інструментальних похибок і врахуванню впливу вертикального прискорення. Крім того, він характеризується покращеною чутливістю, компактними розмірами та простою конструкцією. Зараз ДЄГ активно вивчається та піддається подальшим дослідженням, оскільки його потенціал ще не повністю розкрито. Ці нові дослідження відкривають шлях до більш точного та ефективного визначення гравітаційного прискорення.

В даній роботі чутливим елементом для вимірювання прискорення сили тяжіння буде розглянуто двоканальний ємнісний МЕМС.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1

### БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ (БПЛА)

Безпілотний літальний апарат БПЛА (Unmanned aerial vehicle - UAV) – це літальний апарат, який здійснює політ без присутності пілота на борту. Керування такого літального апарату здійснюється дистанційно або може бути повністю автономним, включаючи зліт та посадку.

Найперший зареєстрований випадок використання безпілотних апаратів відбувся в 1849, коли австрійські збройні сили атакували італійське місто Венеція непілотованими повітряними кулями із вибуховими речовинами, які стали відомими в історії як Австрійські повітряні кулі. Пізніше 1933 року у Великій Британії розроблений перший БПЛА багаторазового застосування Queen Bee. Були використані три відновлених біплани Fairy Queen, віддалено керовані з судна по радіо [1]. Першим широкомасштабним використанням БПЛА військовими силами стало використання їх під час війни у В'єтнамі. За допомогою БПЛА здійснювалися розвідувальні місії та атаки на ворожі об'єкти. Згодом, БПЛА стали широко використовуватися у війнах та конфліктах по всьому світу. США використовували БПЛА під час воєнних операцій у Іраку та Афганістані. Ізраїль активно використовує БПЛА для забезпечення безпеки своїх кордонів та відстеження терористичних загроз. Протягом Другої світової війни і до кінця 1992 року, головний інтерес розробників безпілотних літальних апаратів (БПЛА) був спрямований на їх використання для скидання торпед. З виникненням нових технологій безпілотні літальні апарати стали застосовувати для моніторингу, зйомки, розвідки, визначення місцезнаходження та інших цілей.

Сьогодні інтенсивно працюють над розробкою нових безпілотних апаратів (БПЛА) з різними конструкціями та модифікаціями. Це свідчить про постійне розширення та удосконалення їх застосування. Нові БПЛА мають більшу маневреність та здатність виконувати різноманітні завдання

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.1 Класифікація БПЛА

БПЛА класифікують по льотно-технічними характеристиками та власне за призначенням такого літального апарату. Класифікацію безпілотних літальних апаратів зображена на (рис.1.1).

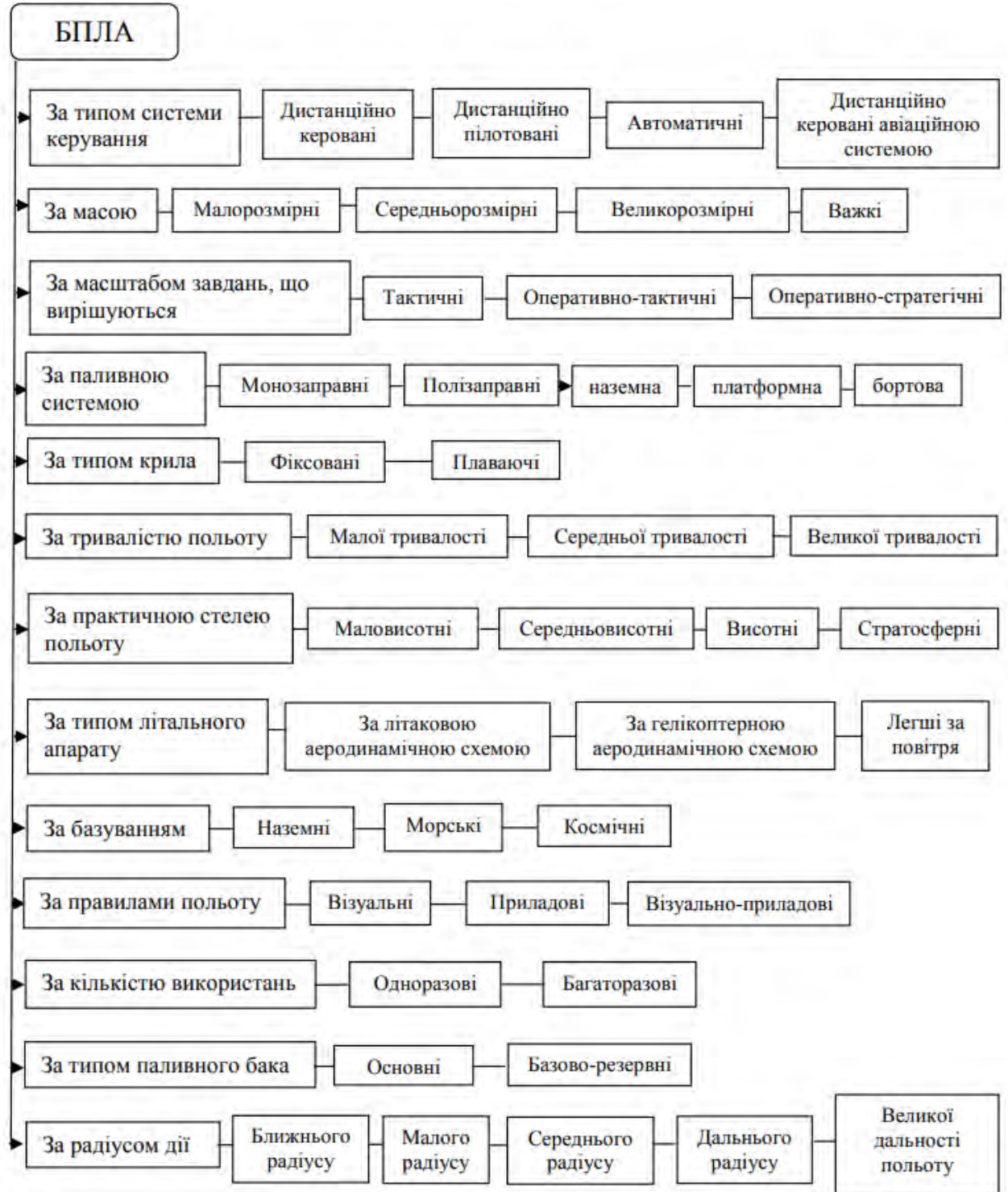
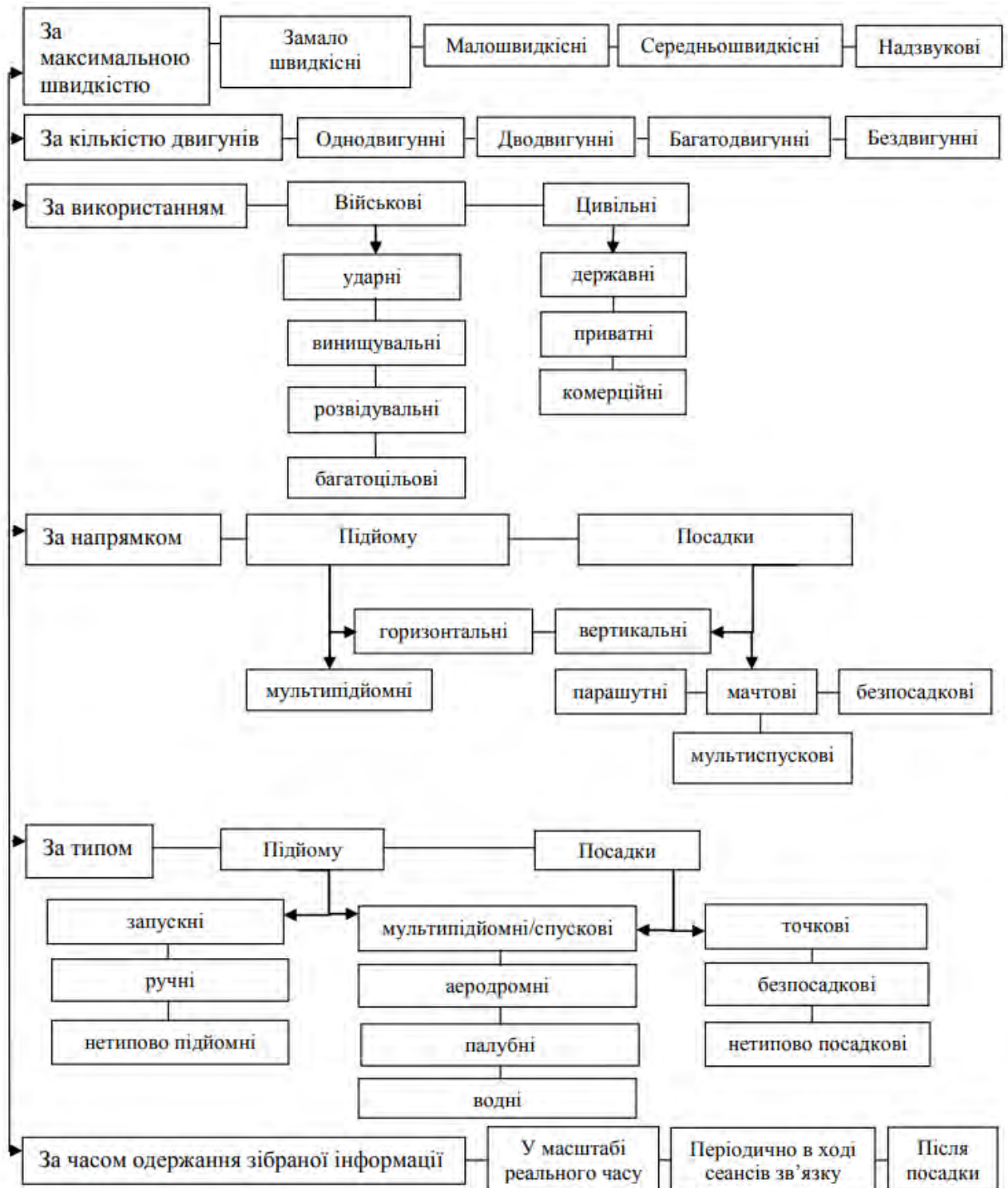


Рис.1.1 – Класифікація БПЛА [2]



Продовження рис.1.1 – Класифікація БПЛА [2]



## 1.2 Конструкція БПЛА

Безпілотний літальний апарат (дрон) складається з різних елементів, компонентів та систем, які працюють для забезпечення його функціональності.

Основні елементи та компоненти дрона включають:

- Корпус. Основна конструкція, яка утримує всі компоненти дрона і надає йому механічну міцність.
- Пропелери: Ротаційні крила апарата, що генерують тягу і забезпечують підйом та маневреність дрона.
- Двигуни внутрішнього згорання, електричні двигуни або гібридні двигуни, які приводять у рух пропелери і створюють необхідну тягу для польоту.
- Електроніка керування: включає в себе контролери польоту, гіроскопи, акселерометри, барометри, компаси та інші сенсори, що визначають положення та орієнтацію дрона в просторі.
- Батареї: Живлення для безперервної роботи дрона. Зазвичай використовуються літій-полімерні акумулятори.
- Камера або сенсори: Деякі дрони мають вбудовані камери або інші сенсори, такі як теплові камери, лазерні дальноміри або різноманітні сенсори зображення, для збору даних або зйомки відео та фотографій.
- Трансмітер та приймач: Бездротова система керування, що дозволяє пілоту керувати дроном з відстані.
- GPS-приймач: Система глобального позиціонування, яка надає інформацію про місцезнаходження дрона.
- Інші системи: Включають системи стабілізації, автопілоту, системи уникнення перешкод, системи передачі даних, підсвітку, парашут безпеки

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянемо основні типи БПЛА за типом конструкції на (рис.1.2).



Рис.1.2 а) - Мультироторний дрон; б) - Однороторний дрон;  
в) - Дрон з фіксованим крилом; г) - Гібридний дрон.

Однороторні дрони використовують один великий ротор та невеликий хвіст для контролю його напрямку. Нагадують гелікоптер та є дуже енергоефективними. Мають високу маневреність, високу носову вантажопідйомність. Є компактними та зручними для транспортування порівняно з іншими дронами. До недоліків можна віднести вібрації через один ротор, складніші у керуванні.

Мультироторні дрони використовують кілька роторів для польоту та управління. Конструкція з більшим числом плечей дозволяє досягти більшої стабільності польоту, тоді як подвійні гвинти, розташовані на меншій кількості плечей, забезпечують підвищену тягу дрона, що призводить до збільшення корисної вантажопідйомності та забезпечує захист у разі відмови одного з двигунів.

Класифікація каркасних конструкцій переважно здійснюється на основі кількості плечей, що використовуються.

- Бікоптери – (2 двигуни);
- Трикоптери – (3 двигуни);
- Квадрокоптери – (4 двигуни);

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Гексакоптери – ( 6 двигунів);
- Октокоптери – ( 8 двигунів);

Розрізняють п'ять основних типів БПЛА залежно від розташування гвинта:

- **+** - один гвинт ведучий (не менше 4 гвинтів),
- **X** - найпоширеніша конструкція, два гвинти провідні (з парною кількістю гвинтів),
- **Y** - три руки, розташовані у знаку Y, одна або дві руки можуть бути провідними,
- **V** - дуже рідкісна композиція, де два гвинти ведуть на витягнутих руках,
- **H** - дуже рідкісна композиція, де в основі конструкції лежить буква H, з двома провідними пропелерами. [10].

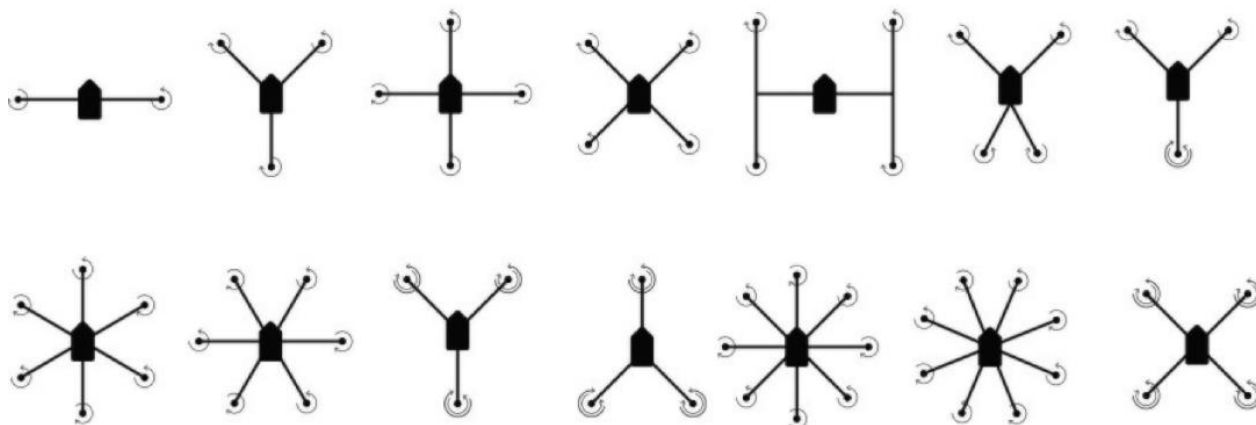


Рис. 1.3 – Варіанти компоновання мультироторних дронів[11].

БПЛА з фіксованим крилом є типом безпілотних повітряних апаратів, які мають постійне фіксоване крило, схоже на крило літака. Можуть мати різну конфігурацію крила, таку як пряме крило, крило зі згином (профіль Гоффа) або крило зі зміщеним центром тяжіння (крило "V"

або "W"). БПЛА з фіксованим крилом мають здатність до ефективного польоту на великій швидкості та на великій відстані. Можуть легко підтримуватися в повітрі з меншим споживанням енергії, мають більшу стабільність під час польоту. досягають високих швидкостей та можуть працювати на великій відстані від оператора. Це робить їх ефективними для моніторингу великих територій, здійснення довгих польотів або доставки вантажів. До недоліків БПЛА з фіксованим крилом можна віднести меншу маневреність та необхідність довгих підйомно-посадкових ділянок для старту та посадки, що може обмежити їх можливості у міських районах.

Гібридні БПЛА зазвичай мають вертикально розташовані пропелери або ротори, які забезпечують їм здатність злітати та приземлятися вертикально, а також змінювати позицію в повітрі. Після досягнення необхідної висоти або швидкості, крила розкриваються і дрон ефективно летить вперед за підтримки підйомної сили крила. Вертикальні пропелери зазвичай вимикаються або використовуються для допомоги у керуванні та стабілізації.

### 1.3 Військові БПЛА

Розвідувально-ударний безпілотник «Сокіл-300» від КБ «Луч». (рис.1.4). Комплекс призначений для ведення розвідки та нанесення ударів на оперативну та тактичну глибину противника.



Рис.1.4 - Ударний безпілотник "Сокіл-300" [3]

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комплекс "Сокіл-300" може бути оснащений одним з трьох двигунів: МС-500В-05С/СЕ, АІ-450Т2 або Rotax 914. Вибір двигуна впливає на тактико-технічні характеристики безпілотного літального апарату. Максимальна злітна маса коливається від 1130 кг до 1225 кг, крейсерська швидкість варіюється від 150 км/год (Rotax 914) до 335 км/год (МС-500В-05С/СЕ), а максимальна швидкість досягає 580 км/год (МС-500В-05С/СЕ). Двигун Rotax 914 має найбільшу тривалість польоту до 26 годин, що робить його ідеальним для розвідувальних місій, тоді як двигун МС-500В-05С/СЕ має тривалість польоту три години. Радіус дії з радіозв'язком становить 150 км, а з ретранслятором може збільшуватися до 300 км. Максимальна дальність польоту варіюється від 1000 км (МС-500В-05С/СЕ) до 3300 км (Rotax 914). Маса корисного навантаження, яке може нести "Сокіл-300", складає 300 кг. Комплекс також включає кероване протитанкове озброєння з ракетою РК-2П, яке має дальність дії до 10 км. Додатково, може бути встановлено різноманітне радіоелектронне устаткування, зокрема гіростабілізована оптична станція наведення, розроблена "Ізюмським приладобудівним заводом"



Рис.1.5 – Оптична прицільна станція наведення [3]

Цей передовий безпілотний апарат може виконувати завдання спостереження, розвідки та наведення керованої ракети РК-2П,

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуючи лазерний канал, розроблену ДержККБ «Луч».

Гіростабілізована оптична станція здатна працювати як вдень, так і вночі, забезпечуючи високу точність та якість зображення. Також впроваджено нову компактну радіолокаційну станцію, розташовану в передній частині безпілотного апарату, що дозволяє отримувати цінну інформацію про об'єкти навколишнього середовища.

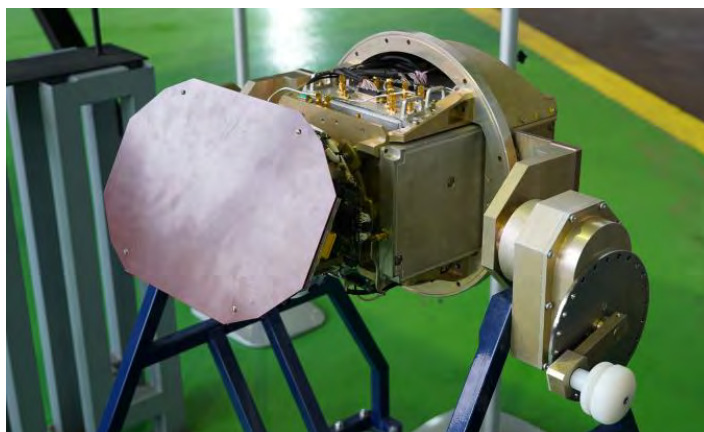


Рис.1.6 – Малогабаритна бортова РЛС [3]

В межах доступних корисних навантажень з'явився інноваційний радар від компанії "Радіонікс" з використанням технології синтезованої апертури, який має здатність роздільної вимірювання на відстань 0,3 метра.. Цей радар SAR (синтетично-апертурна радіолокація) має вражаючу роздільну здатність в 0,3 метра. Використання цього радару дозволяє безпілотному літальному апарату виконувати цифрове картографування місцевості та здійснювати розвідку навіть у випадку наявності хмар. Цей радар разом з оптичною станцією наведення та радіолокаційною станцією утворює типовий комплект для безпілотного комплексу "Сокіл-300".

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.1.7 – Інфографіка «Сокіл-300» [3]

До системи управління літаком входять автопілот, безплатформенна інерціальна навігаційна система, а також система для польоту по картах місцевості [3].

#### 1.4 Комерційний БПЛА



Рис.1.8 – Квадрокоптер Mavic 3T [4]

DJI Mavic 3T Enterprise Series є новаторським комерційним дроном, який встановлює нові стандарти у галузі невеликих комерційних дронів. Він має ширококутну камеру з CMOS-сенсором 1/2 дюйма і роздільною здатністю 48 Мп, а також камеру з зумом та тепловізорну камеру для різноманітних застосувань, включаючи пожежогасіння, пошук і рятування, інспекцію та нічні операції.

					Арк
					23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ

Тепловізійна камера Mavic 3T має високу роздільну здатність 640x512 та функції вимірювання температури точок та областей, попередження про високу температуру, різні кольорові палітри та ізотерми, що допомагають швидко виявляти цілі і приймати відповідні рішення. Ширококутова камера Mavic 3E має великі пікселі розміром 3,3 мкм і інтелектуальний режим низького освітлення, що покращує продуктивність при обмеженому освітленні.

Завдяки тривалості польоту до 45 хвилин, дрон може охоплювати більшу територію за один політ і обстежувати до 2 квадратних кілометрів. Чотирьохантенна антена O3 Enterprise Transmission забезпечує стабільне з'єднання навіть в складних умовах.

Дрон також має ширококутні об'єктиви з усіх сторін для всепрямованого виявлення перешкод без сліпих зон. Його можливості налаштування сигналів наближення та гальмівний шлях залежать від вимог конкретної місії. Вдосконалена система RTH (Return to Home) автоматично планує оптимальний маршрут дрона до точки вильоту, що допомагає економити енергію, час і зусилля.



Рис.1.9 [4]

DJI Mavic 3T має тривалість польоту 45 хвилин, що дозволяє охоплювати більшу територію за кожну місію та здійснювати зйомку до 2 квадратних кілометрів за один політ. Зарядка батарей є швидкою завдяки потужному зарядному концентратору з потужністю 100 Вт або можливості

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



прямої зарядки дрона з використанням швидкої зарядки потужністю 88 Вт. Оснащений 12-мегапіксельною камерою з зумом, Mavic 3T підтримує максимальне гібридне збільшення до 56×, що дозволяє збільшити деталі навіть з великої відстані [4].

Таблиця 1.1 - Порівняння військового та комерційного БПЛА [3,4]

Feature	«Сокіл-300»			Mavic 3T
Тип двигуна	MC-500B-05C/CE	AI-450T2	Rotax 914	Електродвигун
Розмах крила	14 м			У розкладеному стані 347,5×283×107,7 мм (Д×Ш×В)
Довжина	8,57 м			
Маса Пустого/максимальна злітна	535 кг 1225 кг	530 кг 1220 кг	420 кг 1130 кг	920 г 1050 г
Крейсерська швидкість	335 км	275 км	150 км	-
Тривалість польоту	3 год	5 год	26 год	45 хв
Максимальна дальність польоту	1000 км	1300 км	3300 км	32 км
Максимальна швидкість	580 км/год	466 км/год	210 км/год	54 км/год
Максимальна висота	до 12 км			6 км
Радіус дії дистанційного керування	Радіус дії з радіозв'язком 150 км			15 км
	Радіус дії з ретранслятором 300 км			
Система керування	ІНС + GPS + карта місцевості			GPS + ГЛОНАСС + BeiDou + Galileo
Робоча температура	-			від -10° до 40°С
Озброєння	Керовані ракети з дальністю ураження до 10 км			-
Ціна	45,6 млн \$			8-9 тис.\$

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні літальні апарати складно класифікувати оскільки по масі вони відносяться до одного класу, а по дальності польоту до іншого, різниця в конструкції, типу зліту та інші. З розвитком безпілотної авіації та постійним випуском нових моделей БПЛА, існуючі класифікації можуть не враховувати всі види БПЛА, які доступні сьогодні. Ця галузь швидко змінюється, і нові технологічні розробки приводять до появи нових типів та категорій БПЛА. Тому, можна стверджувати, що існуючі класифікації не є повними і можуть вимагати періодичного оновлення та розширення. Оскільки цей сегмент продовжує розширюватись та еволюціонувати, важливо враховувати нові моделі та враховувати їх у подальших класифікаціях, щоб бути більш точним і актуальним у визначенні різних видів БПЛА.

### 1.5 Висновок до першого розділу

Провели огляд сучасних класифікацій БПЛА. Розглянули основні типи БПЛА за типом конструкції. Розглянули класифікацію БПЛА за кількістю двигунів та можливість розташування каркасів. Розглянули два різні види безпілотників: військові та комерційні. Порівняли їх технічні характеристики.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						26
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## РОЗДІЛ 2

### АВТОМАТИЗОВАНИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС БПЛА

Автоматизований навігаційний комплекс (АНК) є комплексною системою, яка використовується для навігації, позиціонування та визначення параметрів об'єктів у режимі реального часу.

Навігаційний комплекс (НК) використовують для вимірювання прискорення гравітаційного поля Землі в важкодоступних регіонах. (НК) безпілотного літального апарата (БПЛА). Точність вимірювань напряму залежить від точності гравіметра - чутливого елемента, що використовується у даному випадку. Використання безпілотних літальних апаратів з навігаційними комплексами дозволяє швидше і точніше визначити значення гравітаційного прискорення ( $g$ ) та його зміни ( $\Delta g$ ), а отримані дані негайно вводяться до блока керування безпілотником. Це суттєво покращує точність визначення цих параметрів.

Гравіметр - прилад, що використовується для вимірювання ПСТ  $g$  та його аномалій  $\Delta g$ . Гравіметр є універсальним пристроєм, на практиці його практично завжди використовують у гео- та гравірозвідувальних роботах. Завдяки геоінформаційному аналізу можна встановлювати наявність корисних руд в надрах без проведення буріння або інших будь яких фізичних робіт. Такий підхід дозволяє значно знизити бюджет виконання робіт шляхом уникнення зайвих свердловин або будівництва шахт.

#### 2.1 Принцип роботи навігаційного комплексу

Основні функції НК [17]:

- Вимірювання питомої сили;
- Стабілізування віссі чутливості гравіметра у положенні вертикалі;
- Визначення координати місцезнаходження та швидкості;
- Вимірювання висоти;
- Здійснювати обчислювальні операції;

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

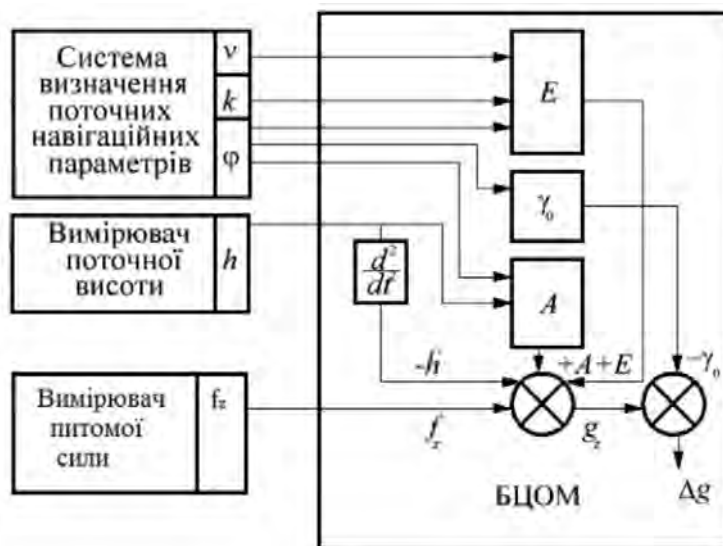


Рис. 2.1 – Функціональна схема навігаційного комплексу [17].

Функціональна схема для отримання  $g$  та  $\Delta g$  з сукупності певних сигналів та сигналів завад.

## 2.2 Основні типи вимірювання ПСТ:

- Статичні, Вимірюване значення вказує на величину розтягу, спричинену вантажем, у пружному елементі
- Динамічні, у полі сили тяжіння спостерігається переміщення вантажу..

Методи визначення ПСТ можуть бути абсолютними та відносними. При абсолютному методі дозволяють визначити повну силу тяжіння без будь-яких відхилень. У таких випадках вимірюються не лише час, а лінійні відстані, такі як довжина маятника або шлях, пройдений вільнопадаючим тілом.

До категорії відносних методів відносяться ті, які дозволяють виміряти зміну прискорення сили тяжіння у порівнянні з певною вихідною точкою. Динамічний метод вимірювання сили тяжіння можуть бути як абсолютними, так і відносними, проте статичні методи вимірювання є лише відносними.

					Арк
					28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

### 2.3 Основні методи вимірювання прискорення [17]:

- Балістичний метод: вимірювання залежності відстані, пройденої тілом, від сили тяжіння;
- Метод маятника: встановлення зв'язку між величиною сили тяжіння та періодом коливань маятника фіксованої довжини;
- Струнний метод: визначення залежності між частотою коливань струни та прискоренням сили тяжіння. Усі три попередні методи базуються на спостереженні руху тіла, тому вони є динамічними;
- Пружинний метод: вимірювання зміни положення рівноваги в пружинних вагах, коли на них навантажується об'єкт з постійною масою. При зміні прискорення сили тяжіння спостерігається деформація пружного елемента, яку вимірюють. Цей метод вимірювання є статичним;

Для проведення аерогравіметричних робіт необхідне спеціальне обладнання, яке включає:

- Авіаційний гравіметр: Цей високоточний прилад використовується для вимірювання сили тяжіння і має високу стабільність нульового сигналу протягом тривалого періоду роботи. Це дозволяє отримати точні дані про силу тяжіння, яка впливає на рух апарату;
- Гіростабілізована платформа: Ця платформа забезпечує стабільність вимірювальної осі протягом всього польоту. Її використання допомагає зменшити вплив вібрацій на авіаційний гравіметр, що забезпечує точність вимірювань;
- Приймач та авіаційна антена навігаційної системи: Для точного визначення положення апарату використовується супутникова навігаційна система (GPS). Ця система забезпечує високу точність вимірювань і дозволяє розраховувати поправки на висоту та прискорення Коріоліса;

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Комп'ютер: Використання стійкого до ударів і вібрацій комп'ютера є важливою характеристикою для забезпечення надійності та продуктивності обробки даних з аерографіметра;
- Допоміжне обладнання на борту БПЛА: На борту БПЛА також має бути присутній блок безперебійного живлення для гравіметра і пульт управління аерографіметричною системою. Це дозволяє забезпечити безперебійну роботу приладу та зручне управління процесом вимірювань;
- БПЛА з точним автопілотом: Використання точного автопілота у БПЛА є важливим фактором для забезпечення стабільності польоту та точності навігації. Це дозволяє досягти необхідної точності курсу та шляху польоту апарату;
- Базові станції супутникової навігації: Базові станції супутникової навігації включають GPS-базові станції, ГЛОНАСС-базові станції і базові станції системи Galileo, які використовуються для вимірювання точних координат і передачі даних на БПЛА. Для підвищення точності визначення координат літального апарату використовуються базові наземні станції у додаток до супутникової навігаційної системи. Це дозволяє отримати більш точні результати визначення положення апарату у просторі;

Спеціальне обладнання навігаційного комплексу є важливим і необхідним для забезпечення точності, стабільності та надійності навігації БПЛА. Спеціальне обладнання, таке як авіаційний гравіметр, гіростабілізована платформа, приймач та авіаційна антена навігаційної системи, комп'ютер, допоміжне обладнання на борту та базові станції супутникової навігації, працюють у взаємодії, забезпечуючи вимірювання сили тяжіння, стабільність вимірювальної осі, точне визначення положення за допомогою супутникової навігаційної системи, швидку та надійну

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
						30
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

обробку даних, безперервну роботу системи та точну навігацію під час польоту. Усі ці компоненти спільно допомагають досягти поставлених **завдань** та забезпечити успішну роботу БПЛА.

#### 2.4 Висновок до другого розділу

Було розглянуто функціональну схему навігаційного комплексу для вимірювання прискорення сили тяжіння, принцип роботи та основні функції НК. Наведені основні типи вимірювання ПСТ: статичні та динамічні. Також розглянуто методи визначення прискорення сили тяжіння. Проведено огляд необхідного спеціального обладнання для забезпечення точності, стабільності та надійності навігації БПЛА.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						31
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## РОЗДІЛ 3

### ОГЛЯД СУЧАСНИХ ГРАВИМЕТРІВ. ВИДИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ

#### 3.1 Струнний гравіметр

Принцип дії струнних [14,17] гравіметрів оснований на фізичні властивості струни змінювати власну частоту коливань. Простіше кажучи частота коливання струни пропорційна прискоренню сили тяжіння. Серед відомих зразків струнних гравіметрів можна навести [14] гравіметр, розробки ВНДІ Геофізики під керівництвом Лозинської А.М. Проте за рахунок рідинного демпфування йому притаманні деякі недоліки: виникнення систематичних похибок, резонанс окремих деталей при вібраціях, за рахунок вертикальної конвекції потоків рідини підвищується значення динамічного температурного коефіцієнту. Струнний гравіметр при простому виконанні має нелінійну характеристику, а також недостатню точність 5-8 мГал.

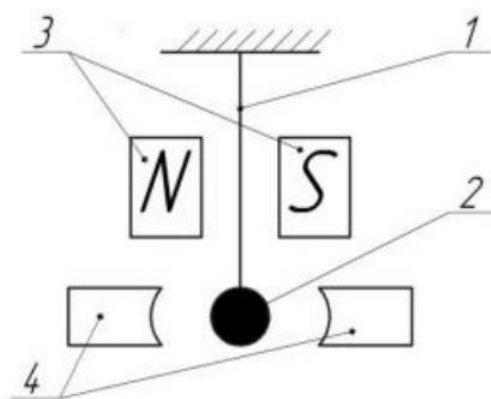


Рис.3.1 – Схема струнного гравіметра

На рис. 2.3. можна [14,17] побачити узагальнену схему струнного гравіметра. Між полюсами постійного магніта 3, на струні 1 підвішена маса 2. Під дією ПСТ ( $g$ ) створюється сила  $mg$ , під дією якої струна починає коливатись з певною частотою.

Якщо на кінець струни подати змінну напругу, вона почне створювати незатухаючі коливання. В результаті можна визначити частоту коливань

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



струни, шляхом порівняння частоти генератора із частотою еталонного генератора.

Переваги СГ: частотний вихідний сигнал, висока чутливість, мала величини сталої часу а також великий діапазон вимірювання вхідної величини.

Недоліки СГ: у простому виконанні – нелінійна вихідна характеристика, тому можуть виникати систематичні похибки, при деяких частотах вібрацій виникають резонанси окремих елементів, що веде до відхилень у показаннях, динамічний температурний коефіцієнт [14,17].

### 3.2 П'єзоелектричний гравіметр

У п'єзоелектричних приладах використовують кристали [14], що мають п'єзо ефект (прямий та обернений). П'єзо ефект полягає у виникненні заряду на гранях пластини виконаної з п'єзоматеріалу. Знак заряду залежить від типу деформації, при зміні від розтягу то стиску знак змінюється на протилежний. Обернений п'єзо ефект виникає, якщо п'єзо пластину помістити у електричне поле, тоді її розміри будуть змінюватись пропорційно змінам параметрів поля.

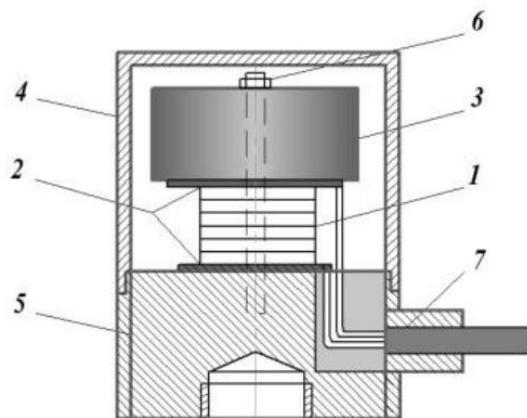


Рис.3.2 - Схема п'єзоелектричного гравіметра.

*1 – п'єзоелемент; 2 – ізолятори; 3 – ІМ; 4 – основа ПГ; 5 – герметичний корпус; 6 – фіксує гвинт; 7 – кабель сигналу [14]*

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На кафедрі АСНК «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом [12] Безвесільної О. М. розроблено та досліджено п'єзоелектричний гравіметр (ПГ) зображений на рис.2.3. П'єзопакет 1, що складається із шарів кристалічного ніобату літію, є чутливим елементом. На торцях п'єзопакету розміщені ізолятори 2 та маса 3. Чутливий елемент притиснений до основи 4 гвинтом 6, щоб покращити стійкість та міцність конструкції. Кабель 7 слугує для з'єднання із операційним підсилювачем.

Переваги ПГ: зручний вихідний сигнал, малі габарити та вага, мала стала часу та висока чутливість.

Недоліки ПГ: У простому виконанні використовується лише для швидкоплинних процесів. [14].

### 3.3 Гіроскопічний гравіметр

Гіроскопічний гравіметр складається із гіроскопічної пластини та маятника, що приєднаний осевим підвісом, який є перпендикулярним до осі обертання гіроскопа. Основною задачею є забезпечення точності при виставленні осі чутливості гравіметра відносно Землі.

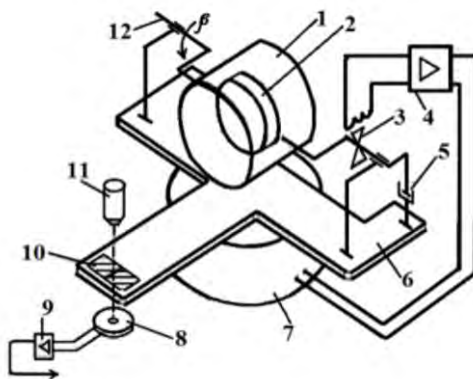


Рис.3.3 – Гіроскопічний гравіметр (ГГ) [12].

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На кафедрі АСНК «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом Безвесільної О.М. розроблено [12] та досліджено ГГ на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень - гіроскопічний вимірювач лінійного прискорення (ГЛП), зображений на рис.2.4.

Гірографіметр складається з гіромотору 1, який містить берилієвий ротор 2. Щоб забезпечити маятниковість відносно осі внутрішнього підвісу 12, ротор датчика 3 кута повороту прикріплений до осі гіромотору 12. Поворотна платформа 6 виконує роль зовнішньої рамки і на ній розміщено стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі внутрішнього підвісу. У конструкції присутній рідинний демпфер 5, який призначений для гасіння кутових коливань. Для вимірювання кута повороту використовується датчик моменту 7, який отримує підсилені сигнали від датчика 3. Імпульс, що виникає при проходженні світлового променя над фотоприймачем 8 через щілину світлонепроникної мембрани 10, служить сигнальним виходом гірографіметра. Цей сигнал подається на блок електронних лічильників через підсилювач 9. Гірографіметр має алюмінієвий захисний корпус для додаткового магнітного захисту. Однак, недоліками цієї конструкції є складність, **збурюючі** моменти обертання та потреба в точному калібруванні чутливої осі графіметра [12].

Дослідження, проведені у США та в Україні в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Безвесільною О. М., показали, що перспективнішими, ніж сильно демпфировані та струнні графіметри для застосування в АГС є прилади типу гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень (ГЛП) [19].

Стабільність показників графіметра типу ГЛП визначається сталістю кінетичного моменту ротора гіроскопа, яка, у свою чергу, визначається стабільністю частоти напруги живлення. Забезпечити сталість кінетичного моменту не так складно, як стабільність інших параметрів, що визначають стабільність роботи згаданих вище типів графіметрів. Проте, незважаючи на свої переваги, гірографіметри мають і певні недоліки. Вони потребують застосування пристроїв для вимірювання кутової швидкості повороту

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гіроскопа, які відрізняються малими габаритними розмірами, невеликим моментом зворотної дії, низьким порогом чутливості, великим діапазоном вимірюваних швидкостей. Це призводить до подорожчання приладу і зниження його надійності. Крім того, для визначення напрямку істинної гравітаційної вертикалі потрібна надзвичайна точність стабілізації осі чутливості приладу. Обертання гіроскопа навколо осі зовнішньої рамки зумовлює появу різного роду збурюючих моментів, що також знижують точність приладу. Тому точність гіроскопічних приладів складає 3 мГл.

### 3.4 Ємнісний гравіметр

Одним з перспективних чутливих елементів для автоматизованих гравіметричних систем є ємнісні гравіметри. Кафедрою авіаційних систем навігації та контролю Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського було розроблено та досліджено одноканальний ємнісний гравіметр (ЄГ). Цей гравіметр працює за принципом зміни ємності конденсатора, який складається з двох металевих пластин, розділених діелектриком. Нижня пластина з'єднана з пружною мембраною, до якої прикріплена маса, а верхня пластина має герметичний корпус. Зміщення маси під впливом сили тяжіння призводить до згинання мембрани, що змінює зазор між пластинами та ємність конденсатора. Значення ємності зворотно пропорційне прискоренню  $g_z$ . Параметри чутливого елемента ємнісного гравіметра вибрані таким чином, що його власні коливання мають частоту, що співпадає з найвищою частотою гравітаційних прискорень, яку можна виміряти в умовах шуму. Таким чином, чутливий елемент гравіметра також виконує функцію фільтра низьких частот.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

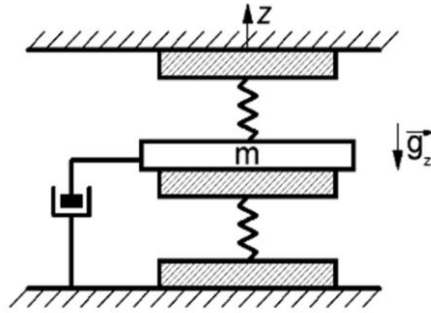





Рис. 3.4 – Принципова схема одноканального ЄГ.[14]


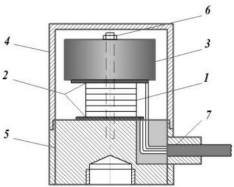
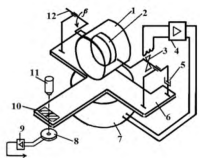
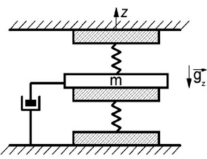
Основні переваги ЄГ: лінійність вихідної характеристики, малі габарити та вага, доволі висока чутливість та стійкість показань.

Основні недоліки ЄГ: невелика потужність вихідного сигналу; наявність шумів; недостатня точність (1 мГал); наявність залишкових похибок. [14,15,16].

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця.3.1 - Існуючих типів гравіметрів. Порівняння характеристика [12,18,20].

Тип гравіметра Фото	Принцип дії Точність	Переваги	Недоліки	Висновок
<p>Кварцовий «Чекан-АМ»</p> 	<p>Маятниковий момент діє на кварцову пластину, у результаті чого виникає електричний заряд, пропорційний прискоренню сили тяжіння (ПСТ) <i>Точність 6 мГал</i></p>	<p>Простота конструкції, надійність, невеликі великогабаритні характеристики</p>	<p>Недостатня швидкодія; велика стала часу; низькі точність і чутливість</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>
<p>Пружинний L-R-S «ScintrexCG-5 Autograv»</p> 	<p>Компенсація моменту за допомогою вертикальної пружини <i>Точність 10 мГал</i></p>		<p>Важкопрогнозований дрейф пружинних властивостей пружинного елемента; недостатні швидкодія та точність</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>
<p>Магнітний МАГ - 1А (GT-1А), TAGS-6</p> 	<p>Компенсація моменту, створення ПСТ, за допомогою магнітної або електромагнітної пружини <i>Точність 8 мГал</i></p>		<p>Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатні швидкодія та точність</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>

<p>Струнний «Гравітон - М»</p> 	<p>Принцип дії заснований на властивості струни змінювати частоту власних коливань при зміні її натягу. Визначення параметрів струни базується на вимірюванні частоти її коливань. Точність 5 мГал</p>	<p>Нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів; недостатні швидкодія та точність</p>	<p>Пружні властивості струни є нестабільними; недостатні точність і швидкодія</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>
<p>П'єзоелектричний Тільки наукові прототипи</p> 	<p>Сила тяжіння <math>gz</math> впливає на інерційну масу (ІМ) <math>m</math>, що призводить до генерації сили тяжіння. Ця сила перетворюється п'єзопакетом на електричний заряд Точність 1,5 мГал</p>	<p>Висока швидкодія, відносно висока точність</p>	<p>Дещо велика постійна часу; недостатня швидкодія; недостатня точність; необхідність використання п'єзопакета для збільшення вихідного сигналу</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>
<p>Гіроскопічний PIGA 16, 25 Гірогравіметр (науковий прототип)</p> 	<p>Момент інерції маятника перетворюється на гіроскопічний момент. Вихідний сигнал пропорційний ПСТ Точність 3 мГал</p>	<p>Висока швидкодія, невеликі габарити, висока точність,</p>	<p>Необхідність прецизійної стабілізації осі чутливості, висока вартість виробництва та складність конструкції</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>
<p>одноканальний ЄГ</p> 	<p>Дія ПСТ перетворюється у зміну зазору між пластинами, а потім – у зміну вихідної напруги Точність 1 мГал</p>	<p>Висока швидкодія, висока точність, малі габарити</p>	<p>невелика потужність вихідного сигналу, наявність шумів, наявність залишкових похибок</p>	<p>Недоцільно використовувати</p>

Продовження таблиці 1.2.

						Арк
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ

### 3.6 Висновок до третього розділу

Були проаналізовані сучасні гравіметри різних типів та різним принципом дії. Виявлено основні недоліки гравіметрів. Вони полягають у низькій точності вимірювання (3—10 мГал) та потребують застосування фільтрації для вихідного сигналу гравіметра АГС, через нестабільність статичного передатного коефіцієнта, що виникає внаслідок змін властивостей конструкційних елементів, а також через невисоку швидкодію. При створення нових типів авіаційних гравіметрів, які мають вищу точність (1—2 мГал) та швидкодію, було розглянуто сучасні перспективні розробки, такі як гіроскопічний, п'єзоелектричний, ємнісний і струнний гравіметри. Основою цих розробок є вибір власної частоти гравіметра, яка знаходиться в точці перетину спектральних характеристик корисного сигналу підземних структур та шуму, пов'язаного з вертикальним прискоренням.

Запропоновано використовувати двоканальний (диференційний) метод вимірювання параметрів сили тяжіння (ПСТ) у всіх конструкціях гравіметрів. Цей підхід дозволяє подвоїти корисний сигнал до  $2g$ , а сигнали основного збурювального вертикального прискорення та інструментальні похибки, спричинені змінами температури, тиску та інших факторів зовнішнього середовища, зникають.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## РОЗДІЛ 4

### ЄМНІСНІ МЕМС ГРАВІМЕТРИ

#### 4.1 Конструкція ЄГ

Гравіметр або ємнісний чутливий елемент є одним з найбільш перспективних елементів навігаційного комплексу, який має високу чутливість.

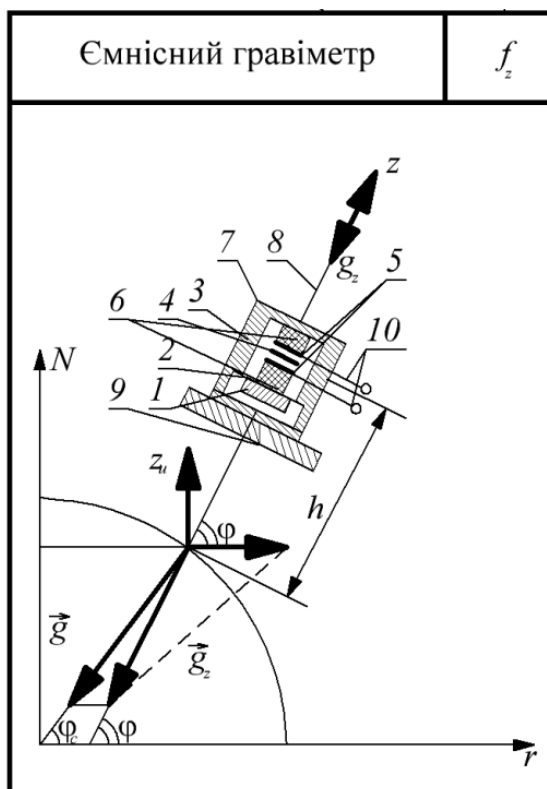


Рис. 4.1 – Схема ємнісного гравіметра (ЄГ)

Ємнісний гравіметр має конструкцію, в якій маса закріплена на металевій мембрані. Ця мембрана дозволяє досягти високої частоти власних коливань підвісу. Конденсатор складається з двох обкладок, причому нижня обкладка з'єднана з мембраною через ізолюючу обкладку, а верхня обкладка з'єднана з корпусом через ту ж ізолюючу обкладку. Для збільшення ємності конденсатора та запобігання пробою використовується тонка слюдяна прокладка як діелектрик. Сигнал від гравіметра передається до блоку цифрової обробки сигналу через провідники, що приєднані до обкладок конденсатора.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

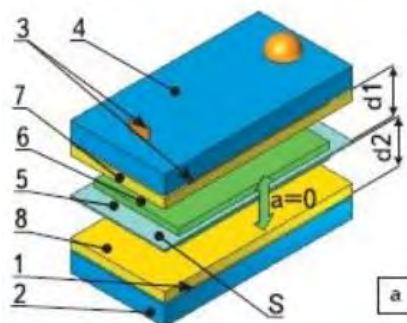
## 4.2 Принцип дії ємнісного MEMS гравіметра

Дія ємнісного акселерометра заснована на зміні ємності його чутливого елемента з електродами, що відбувається при руху інерційної маси, що входить до складу пристрою. Ця зміна ємності виникає внаслідок взаємодії прискорення, яке впливає на інерційну масу.

У більшості MEMS-акселерометрів зміна прискорення призводить до зміни відстані ( $d$ ) між електродами, що впливає на ємність конденсатора. Сенсор акселерометра перетворює цю зміну ємності на вихідний сигнал, який може бути виражений у вигляді електричного заряду, напруги або струму.

Сенсорний елемент акселерометра складається з двох фіксованих електродів, між якими рухається обкладинка, навантажена інерційною масою. Ця обкладинка виступає як спільний електрод для ємнісного півмоста акселерометра.

Застосування диференціального режиму з'єднання двох конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  дозволяє досягти збільшення амплітуди сигналу та покращення лінійності. У цьому режимі, замість вимірювання зміни ємності окремих конденсаторів, вимірюється різниця між їхніми ємностями. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх незалежних факторів, таких як температура або шум, на вихідний сигнал. Таке підключення дозволяє отримати більш точний і стабільний вихідний сигнал, що покращує лінійність і надійність роботи акселерометра.



						Арк
					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

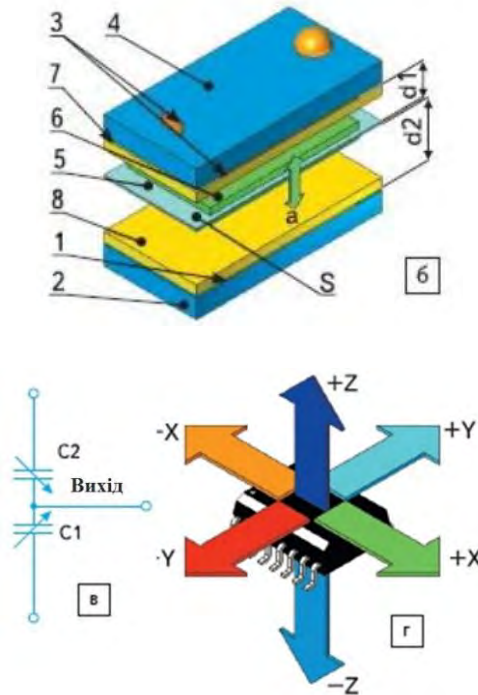


Рис. 4.2 – Принцип ємнісного диференціального акселерометра [17].

Фізична модель вимірювальної структури акселерометра (корпус перетворювача не відображений у спрощеній схемі) може бути описана наступним чином:

- Нерухомі металеві обкладки (1, 3) - це фіксовані електроди, розташовані на протилежних боках акселерометра;
- Зафіксовані друковані плати (2, 4) - це плати, на яких розташовані електронні компоненти та з'єднання;
- Рухома обкладка (5) - це електрод, що може зміщуватись під дією прискорення;
- Інерційна маса (6) - це маса, яка знаходиться на рухомій обкладці і реагує на зовнішнє прискорення;
- Шари діелектрика (7, 8) - це ізоляційні шари, розташовані між металевими обкладками та рухомою обкладкою;
- $S$  - це площа перекриття між нерухомими обкладками, яка є постійною;
- $d1$  та  $d2$  - змінні відстані між обкладками, які змінюються під впливом прискорення;

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Акселерометр у стані спокою (а) показує, що рухома обкладка знаходиться в рівновазі без прискорення. Під дією прискорення (б), рухома обкладка зміщується, що призводить до зміни відстаней  $d_1$  та  $d_2$ . Еквівалентна електрична схема використовується для опису роботи акселерометра. Вона включає конденсатори, опори та інші компоненти, які відображають електричні властивості системи. Розміщення вимірювальних осей і ступенів свободи (півосей) показане на схемі (г) для визначення напрямків вимірювання прискорення.

Ємнісні диференціальні акселерометри використовують таке співвідношення

$$\frac{C_1}{C_2} \text{ або } \frac{(C_1 - C_2)}{(C_1 + C_2)}$$

Формула ємності для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (4.1)$$

Де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність матеріалу;

$d$  - відстань між обкладинками.

$S$  - площа перекриття обкладинок;

$\varepsilon_0$  - діелектрична постійна;

Розвитком технологій МЕМС (мікроелектромеханічні системи) акселерометрів було досягнуто значних покращень. Однією з важливих переваг ємнісних акселерометрів було розширення можливостей вимірювання тривимірних осей. сучасні акселерометри можуть детектувати прискорення вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей - осей X, Y та Z. Це досягається за допомогою мікромеханічних структур, які вимірюють зміну ємності або інших електричних параметрів при переміщенні рухомих обкладинок вздовж трьох осей. Завдяки цьому, сучасні акселерометри можуть вимірювати

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прискорення відносно трьох просторових напрямків, що дозволяє отримати повну інформацію про рух об'єкта в тривимірному просторі.

#### 4.3 Основні компоненти ємнісних MEMS гравіметрів

У ємнісних MEMS гравіметрах також можна виділити основні елементи та вузли, що безпосередньо виконують основну функцію та допоміжні елементи та вузли, що забезпечують їх працездатність. Основні елементи та вузли ємнісних гравіметрів включають чутливий елемент, який зазвичай складається з пружних первинних вимірювальних перетворювачів, таких як пружні балки, мембрани, пружини, стержні або струни. Ці елементи реагують на зміну прискорення або гравітації і змінюють свою форму або положення, що призводить до зміни ємності в ємнісному перетворювачі. Допоміжні елементи та вузли гравіметрів включають електроди, які з'єднуються з чутливим елементом та допомагають вимірювати зміни ємності, інтегральні схеми для обробки сигналу, які перетворюють зміни ємності на вимірювані значення прискорення або гравітації, а також додаткові компоненти для забезпечення стабільності, захисту від шуму, компенсації температурних змін та живлення. Разом ці елементи та вузли дозволяють ємнісним гравіметрам точно та надійно вимірювати прискорення або гравітацію. Завдяки компактному розміру, низькому споживанню енергії та високій точності, ємнісні MEMS гравіметри стали популярними в багатьох додатках, включаючи беспілотні літальні апарати, навігаційні системи, віртуальну реальність та інші області, де вимірювання прискорення.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						45
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

#### 4.4 Різновиди корпусів ЄГ

МЕМС гравіметри можуть мати різні типи корпусів, які забезпечують захист внутрішніх компонентів та стабільність роботи пристрою. Деякі з поширених типів корпусів для МЕМС гравіметрів включають:

- **Керамічні корпуси:** Керамічні корпуси використовуються для захисту гравіметрів від зовнішніх впливів, таких як вібрація, удари і корозія. Кераміка має високу механічну міцність і стійкість до корозії, що дозволяє забезпечити надійний захист для внутрішніх компонентів;
- **Пластикові корпуси:** Пластикові корпуси широко використовуються в МЕМС гравіметрах через їхню низьку вагу, легкість обробки і доступність. Вони можуть бути використані для створення компактних та легких гравіметрів для різних застосувань;
- **Металеві корпуси:** Металеві корпуси, такі як алюмінієві або нержавіючі сталеві, можуть забезпечити високий рівень механічної міцності та електромагнітної захисту. Вони часто використовуються в додаткових заходах безпеки та захисту від електромагнітного впливу;
- **Кремнієві корпуси:** Кремнієві корпуси використовуються в МЕМС гравіметрах, оскільки кремній є основним матеріалом для виготовлення МЕМС-датчиків. Вони можуть бути виготовлені за допомогою мікроелектромеханічних систем (МЕМС) і забезпечують високу інтеграцію та точність вимірювань;

Вибір конкретного типу корпусу залежить від вимог до захисту, маси, розмірів, вартості та інших факторів, пов'язаних з конкретним застосуванням гравіметра.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4.5 Види корпусів ЄГ

Вибір типу корпусу гравіметра залежить від функціонального призначення системи, в рамках якої він буде використовуватися.

Таблиця 4.1 – Основні корпуси ЄГ [18].

<i>LCC (Leadless Chip Carrier)</i>	<i>SIP (system-in-a-package)</i>	<i>LGA (Land Grid Array)</i>
<p>Керамічний корпус, що має низький профіль та квадратну форму, представляє собою конструкцію, розраховану на поверхневий монтаж. Корпус має спеціально розташовані контакти на його нижній частині, які використовуються для з'єднання з іншими компонентами або електричними схемами. Такий тип корпусу забезпечує зручну і надійну установку пристрою, а також можливість легкого з'єднання з іншими елементами системи.</p>	<p>Комбінація електронних компонентів з різними функціональностями об'єднані в один модуль. Цей модуль призначений для виконання різноманітних функцій, які необхідні системі. В результаті цієї комбінації компонентів можливо реалізувати різноманітні функції та забезпечити більш гнучку та ефективну роботу системи.</p>	<p>представляє собою корпус типу PGA, в якому традиційні штирькові контакти замінені контактними площадками. Цей тип корпусу може бути встановлений у спеціальне гніздо, яке має пружинні контакти, або може бути припаяний безпосередньо на друковану плату.</p>
		

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4.6 Висновок до четвертого розділу

В розділі було розглянуто схему ємнісного гравіметра, огляд конструкції та принцип дії. Також було розглянуто основні компоненти ємнісних МЕМС гравіметрів. Різновиди та типи корпусів ємнісних гравіметрів на базі МЕМС.

Недоліки ємнісних одноканальних гравіметрів включають обмежену точність порівняно з багатоканальними гравіметрами, чутливість до шумів та електромагнітних перешкод, обмежену пропускну здатність, вплив зовнішніх факторів. Усі ці фактори можуть обмежувати ефективність та точність вимірювань гравітаційних змін.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						48
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



## РОЗДІЛ 5

# ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ МЕМС ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПОХИБОК ЄМНІСНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА

### 5.1 Рівняння руху ДЄГ

Коливальну систему ЄГ, представлену на рис. 5.1. демпфуючий елемент (ДЕ), інерційна маса (ІМ),  $k$  - коефіцієнт пружності. Повітря виступає як демпфуючий елемент, що створює певний опір рухові ІМ. Пружні властивості ємнісного гравіметра характеризують елемент жорсткості:

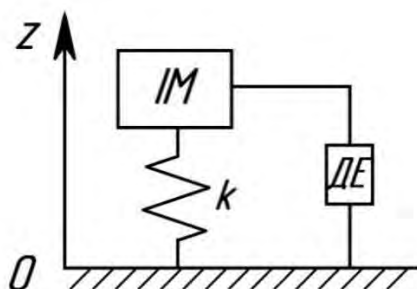


Рис 5.1 – Коливальна система ЄГ [12].

Рух інерційної маси (ІМ) розглядається в інерціальній системі відліку і відбувається в одному напрямку - вздовж осі 0-z, яка перпендикулярна площині, на якій розташовано елемент гнучкого з'єднання (ЄГ).

У цій системі коливань ми припускаємо, що опір, ІМ та інші складові ЄГ є недемпфованими, тобто відсутня будь-яка форма зовнішньої або внутрішньої демпфуючої сили.

Маса пружного елемента вважається набагато меншою за масу ІМ. Це дозволяє нам упростити аналіз системи, припускаючи, що маса пружного елемента не впливає на коливання системи.

У межах можливих коливань сила пружності пропорційна деформації пружного елемента. Це означає, що чим більше пружний елемент деформується, тим більша сила пружності діє на ІМ, і навпаки.

Під час руху ІМ на неї діє інерційна сила від дії вертикального прискорення БПЛА  $F_i$  сила опору руху ІМ  $F_{op}$  та сила пружності  $F_{np}$ .

$$F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (5.1)$$

					Арк
					49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$F_i = -n \frac{dx}{dt}, \quad (5.2)$$

$$F_{\text{пр}} = -kx, \quad (5.3)$$

Де,  $n$  – коефіцієнт затухання;

$k$  – коефіцієнт пружності пружного елемента;

$x$  – зміщення ІМ відносно положення рівноваги ЄГ.

За другим законом Ньютона, рух ІМ із прискоренням  $g_z$  забезпечує сила:

$$G = mg_z, \quad (5.4)$$

Де,  $m$  – величина ІМ.

$G$  – сила, яка діє на ІМ;

З врахуванням (4.1-4.4) кінцеве рівняння руху ДЄГ:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + kx = -mg_z, \quad (5.5)$$

Враховуючи інерційність конструкції ЄГ, першими складовими можна знехтувати у рівнянні

Зважаючи на інерційність конструкції ЄГ, двома першими складовими у рівнянні (5.5) знехтуємо та отримуємо:

$$kx = -mg_z, \quad (5.6)$$

Рівняння руху одноканального ЄГ буде [23]:

$$g_z = -\frac{k}{m}x, \quad (5.7)$$

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідна напруга  $u_1$  пропорційна зміщенню інерційної маси  $x$ . Вихідний електричний сигнал ЄГ буде:

$$u_1 = k(mg_z), \quad (5.8)$$

Для ДЄГ на елемент обох каналів ді прискорення  $g_z$ . Для двоканального сигналу вихідна напруга буде:

$$u_1 = k(mg_z), \quad (5.9)$$

$$u_2 = k(mg_z), \quad (5.10)$$

Де  $u_1 u_2$  – відповідно вихідні електричні сигнали для одного та другого каналу ємнісного елемента,  $m$  – інерційна маса у кожному з каналів. Вихідні Електричні сигнали в обох каналах ємнісного елемента  $u_1$  та  $u_2$  сумуються в суматорі. Отже, рівняння набуває вигляду:

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2 \cdot kmg_z, \quad (5.11)$$

де  $u_{\Sigma}$  – вихідний сигнал підслювача. Отже, з врахуванням (5.11) двоканального ЄГ рівняння руху у умовах установки на Землі, буде:

$$kx = -2mg_z, \quad (5.12)$$

Отримали рівняння руху ДЄГ на Землі.

Рівняння руху у складі навігаційного комплексу [23] з одним гравіметром:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi + \\ + 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi - 2 \frac{v_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (5.13)$$

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

Перепишемо рівняння через ПСТ:

$$g_z = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (5.14)$$

Аномалія ПСТ дорівнює дельті ПСТ вздовж всієї осі чутливості ДЄГ. Тому рівняння руху НК для визначення аномалії ПСТ, набуває вигляду:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi - \ddot{h} - \Delta_3 + \gamma_0, \quad (5.15)$$

Двоканальний ємнісний гравіметр в складі НК є фільтром основного збурення та чутливим елементом. Отже, рівняння руху навігаційного комплексу із ДЄГ для визначення  $\Delta g$  буде мати вигляд:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi - \Delta_3 + \gamma_0, \quad (5.16)$$

Оскільки використано диференціальний ємнісний гравіметр (ДЄГ), який компенсує вплив вертикального прискорення, рівняння (4.15) не містить

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вертикального прискорення  $h''$ . Вплив вертикального прискорення у цьому випадку перевищує корисний сигнал ПСТ в 103 рази. Рівняння (4.16) можна спростити до більш простої форми:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0 + \Delta_3, \quad (5.17)$$

де  $f_z$  – вихідний сигнал ДЄГ;

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

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

$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \cdot \sin^2\varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$  - довідкове значення ПСТ (формула Кассініса).

$$\gamma_{0e} = 9,78049 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} - \text{ значення довідкове ПСТ (екваторіальне) [30].}$$

Потрібно враховувати при вимірюваннях ПСТ з точністю до 1 мГал.

$\Delta_3 = K_{\text{ер}} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \right)$  - похибка від впливу кутової швидкості обертання Землі, де  $\lambda$  – довгота;  $\varphi$  – широта;  $\bar{\varphi}$  – середнє значення широти [24,25]:

Аналізуючи рівняння, можна зробити висновок, що навігаційний комплекс (НК) складається з різних підсистем, кожна з яких виконує свою функцію: гравіметр вимірює величину сили тяжіння, гіроскопи стабілізують ось чутливості датчиків електромагнітного горизонту у вертикальне положення, інерціальна навігаційна система (ІНС) визначає координати місцезнаходження та швидкості, а блок керування (БК) здійснює обчислювальні операції. Тому рівняння можна представити у вигляді функціональної схеми, яка відображає взаємозв'язок цих підсистем.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

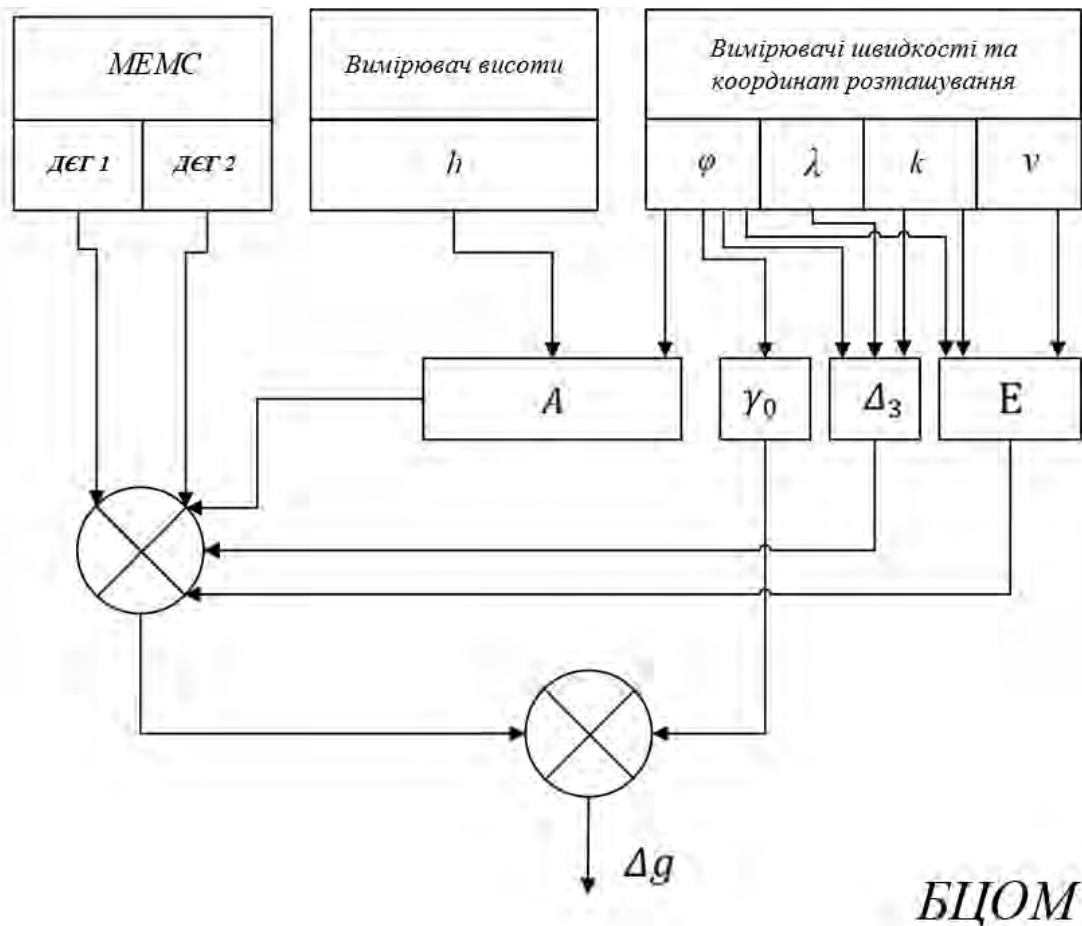


Рис 5.2 – Функціональна схема навігаційного комплексу.

Якщо ДЄГ встановити на БПЛА то повне рівняння руху НК набуватиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 kx = & 2g_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[ 1 - 2\cos^2\varphi \cdot \left( 1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v \cdot \sin k \cdot \\
 & \cos\varphi - 2h \frac{e}{r} v \cdot \cos k \cdot \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cdot \cos^2\varphi + \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \cdot \\
 & \sin^2\varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi) + K_{ег} \left( \frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

Двоканальний ємнісний гравіметр відрізняється від інших гравіметрів тим, що він уникає вимірювання вертикального прискорення, що є головною причиною похибки вимірювання та використовує одну величину на вході та іншу на виході, функціонуючи як перетворювач вхідного сигналу на вихідний. Його особливістю в порівнянні з одноканальним ємнісним гравіметром є

можливість ефективного усунення найсильніших похибок, таких як вплив вертикального прискорення повітряного апарата або інструментальні похибки.

### 5.3 Структурна схема двоканального ємнісного гравіметра

Двоканальний ємнісний гравіметр працює як перетворювач вхідного сигналу на вихідний, використовуючи дві величини: одну на вхід та іншу на вихід. Цей гравіметр має додаткову перевагу порівняно з одноканальним в тому, що він ефективно усуває вплив найсильніших похибок, таких як вертикальне прискорення БПЛА або інструментальні похибки.

Складемо структурну схему ДЄГ та визначимо передаточний коефіцієнт  $K_{\text{ЄГ}}$ :

Структурна схема ЄГ рис. 5.3:

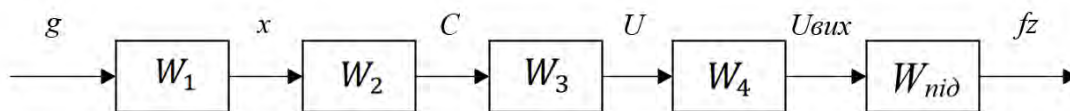


Рис.5.3 - Структурна схема ЄГ

Наведена структурна схема одноканального ємнісного гравіметра, де ланка  $W_1$  відповідає за зміну відстані між обкладинками ПСТ, яка відбувається під впливом сили земного тяжіння  $G$ , що діє на масу ємнісного елемента (ЄЕ). У даній схемі сила тяжіння  $G$  діє перпендикулярно до площини рухомої обкладки, що призводить до рівномірної зміни відстані між ними. Згідно з рівнянням  $G = 2F_{\text{пр}} = 2kx$ , де  $F_{\text{пр}}$  є силою пружності, а  $x$  - зміною відстані, залежність між силою тяжіння  $G$  та зміною відстані можна виразити через коефіцієнт пружності  $k$ . Ланка  $W_2$  відповідає за зміну відстані між обкладинками і перетворює цю зміну в зміну ємності  $C$  на електродах.

Ланка  $W_3$  перетворює зміну ємності на електродах в зміну напруги на чутливому елементі.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ланка  $W_4$  описує процес, який відбувається при зміні напруги на ємнісному елементі.

Ланка  $W_{\text{під}}$  представляє передаточну характеристику операційного підсилювача напруги.

На рисунку 5.5 представлена структурна схема двоканального ЄГ..

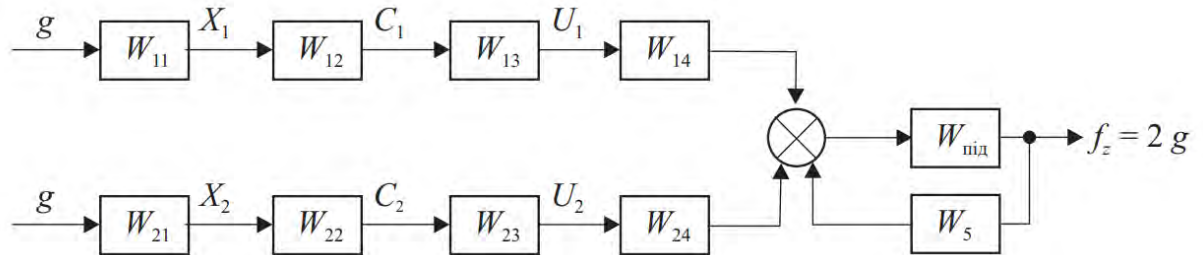


Рис 5.4 – Структурна схема ДЄГ [12].

$W_{11}$  - перетворення описує зміну відстані між обкладинками під впливом ПСТ і його вплив на ємнісний елемент.  $W_{21}$  відображає зміну відстані між обкладинками, що перетворюється на зміну ємності  $C$  на електродах.  $W_{12}$  та  $W_{22}$  описують перетворення зміни ємності на зміну напруги на електродах чутливого елементу.  $W_{13}$  та  $W_{23}$  позначають зміну ємності, що перетворюється у зміну напруги на електродах чутливого елементу.  $W_{14}$  та  $W_{24}$  описують процес, який відбувається при зміні напруги на ємнісному елементі.  $W_{\text{під}}$  позначає передатну характеристику операційного підсилювача напруги.  $W_5$  відображає фільтрування зворотнім зв'язком.

Ланка  $W_2$  відповідає за зміну відстані між обкладинками і перетворює цю зміну в зміну ємності  $C$  на електродах:

$$W_2 = \frac{\Delta C}{x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot x}{d \cdot x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (5.19)$$

Де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність матеріалу;

$d$  = відстань між обкладинками.

$S$  - площа перекриття обкладинок;

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$\varepsilon_0$  - діелектрична постійна;

Ланка  $W_3$  відповідає за перетворення зміни ємності  $\Delta C$  на зміну напруги  $\Delta U_{\text{ЕУ}}$  на електродах чутливого елемента

$$W_3 = \frac{\Delta U_{\text{ЕУ}}}{\Delta C} = \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot \Delta C}{C \cdot \Delta C} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{C}, \quad (5.20)$$

Передатна функція ланки  $W_4$ , яка відповідає за процес передачі зміни напруги  $\Delta U_{\text{ЕУ}}$  в коло вхідної напруги  $U_{\text{ВХ}}$  може бути описана як диференціююча функція. Вхідний опір підсилювача напруги позначається як  $R_{\text{ВХ}}$ :

$$W_4 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ЕЕ}}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \cdot \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}, \quad (5.21)$$

Де коефіцієнт,  $\varepsilon_R = \frac{R_{\text{ЕЕ}} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$ ,

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

Ланка  $W_{\text{під}}$ , яка відповідає за передатну характеристику операційного підсилювача напруги, можна описати як інерційну ланку першого порядку. Вона виявляє властивості такої ланки, яка має затримку або інерцію у відповіді на зміни вхідного сигналу:

$$W_{\text{під}} = \frac{K_{\text{ОП}}}{1 + p\tau_{\text{ОП}}}, \quad (5.22)$$

Де  $K_{\text{ОП}}$  коефіцієнт підсилення операційного підсилювача,

$\tau_{\text{ОП}}$  постійна часу.

Ємнісний гравіметр функціонує у вузькому діапазоні частот. Отже, коефіцієнт підсилення операційного підсилювача (ОП) можна приблизно вважати рівним передатній характеристиці ланки  $W_{\text{під}}$  :

$$W_5 = K_{\text{ОП}}, \quad (5.23)$$

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальне передатне відношення має вигляд:

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

#### 5.4 Конструкція ємнісного MEMС чутливого елементу

Модифікація конструкції ємнісного двоканалного гравіметра включає зустрічно-штирьове розташування електродів обкладинок, що призводить до покращення його функціональних характеристик. У цій модифікації, маса кріпиться до кристалу за допомогою пружних підвісів, забезпечуючи гнучкість і амортизацію. Рухомі електроди розташовані безпосередньо на масі, тоді як нерухомі електроди розташовані праворуч та ліворуч від рухомих. Ця конструкція дозволяє досягти більш точних вимірювань та усунути вплив небажаних шумів і похибок, забезпечуючи високу чутливість та стабільність вимірювань гравітаційних полів.

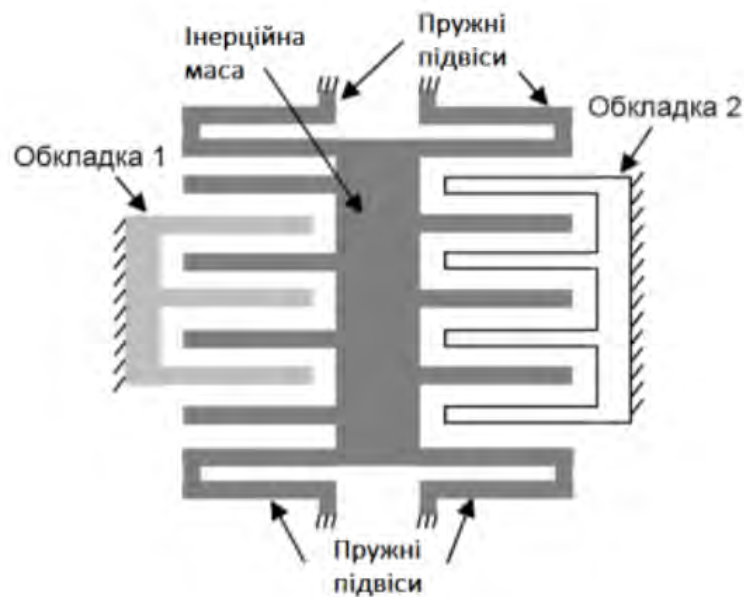


Рис 5.4 – Конструкція ємнісного диференційного MEMС акселерометра з супротивно-штифтовим розташуванням електроди пластин [26].

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для отримання потужнішого вихідного сигналу та досягнення більш точних показань порівняно з одноканальним ємнісним гравіметром, використовується техніка з використанням кількох однакових ємнісних перетворювачів, розташованих на одній МЕМС-пластині. Це дозволяє підвищити чутливість та стабільність вимірювань шляхом паралельного зчитування сигналів з декількох перетворювачів. Такий підхід дозволяє компенсувати вплив шумів та похибок, покращуючи якість вимірювань гравітаційних полів та забезпечуючи більш точні результати.

Система досягає двоканальності шляхом встановлення двох ідентичних симетричних МЕМС-пластин. Вихідні сигнали цих пластин сумуються у суматорі, а потім передаються на подальшу обробку та підсилення. Завдяки двоканальності системи, вдається знизити вплив зовнішніх фізичних факторів та покращити лінійність вихідного сигналу. Це дозволяє отримувати більш точні та надійні вимірювання, зменшуючи похибки, що можуть впливати на результати вимірювань.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						59
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

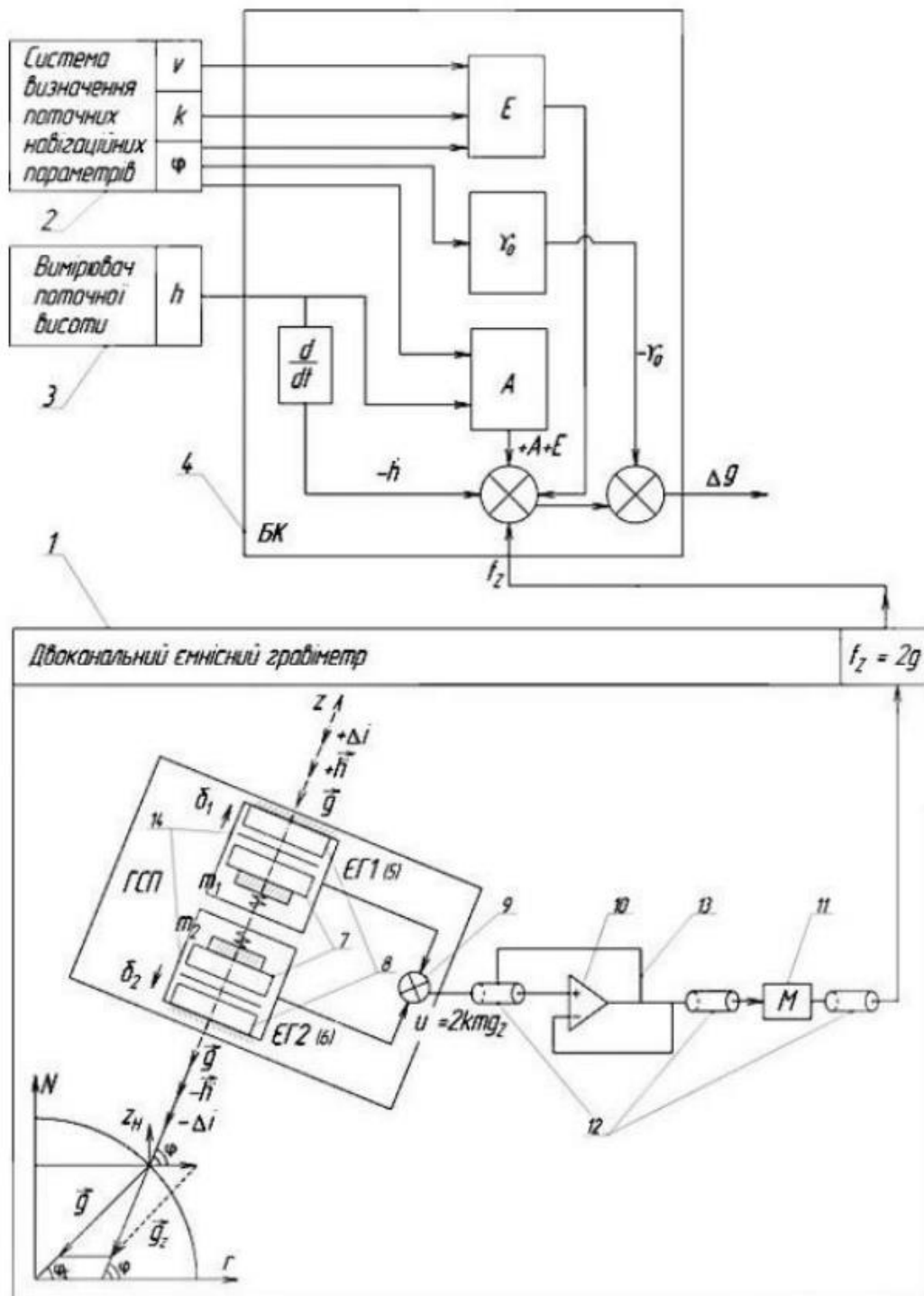


Рис. 5.5 – Ємнісний МЕМС ДЄГ автоматизованого НК [27].

5,6 – ємнісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 відповідно, 7 – рухомі і 8 – нерухомі пластини, 9 – суматор, 10 – підсилювач, 11 – цифровий модуль, 12 – екрановані коаксіальні кабелі, 13 – захисне кільце, 14 – діелектрики [27].

## 5.7 Основні параметри МЕМС Гравіметра

Власна частота коливань:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (5.24)$$

Де  $m$  – маса,  $K$  – коефіцієнт пружності підвісу;

Абсолютний та відносний коефіцієнти демпфування розраховуються за наступними формулами [26]:

$$b = n\mu \cdot \frac{h^3 l}{d^3}, \quad (5.25)$$

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}, \quad (5.26)$$

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

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

$$U_0 = \sqrt{\frac{8d^3 k}{27\varepsilon_0 S}}, \quad (5.27)$$

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму, де  $S$  – площа обкладки.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5.8 Класифікація та аналіз похибок МЕМС ДЄГ

Похибки двоканального ємнісного МЕМС гравіметра можна класифікувати наступним чином:

- *Статичні похибки:* Ці похибки виникають у стабільних умовах без зміни вимірюваного параметра. Статичні похибки можуть бути спричинені нелінійністю перетворювачів, похибками вимірювального діапазону або неправильним калібруванням. Вони можуть бути скореговані шляхом відповідного налаштування та коригування системи;
- *Динамічні похибки:* Ці похибки виникають при зміні вимірюваного параметра з часом або при зміні умов вимірювання. Динамічні похибки можуть бути пов'язані зі затримкою відгуку системи, нелінійністю чутливості до швидкості зміни параметра або недостатньою швидкістю вимірювань. Для зменшення динамічних похибок можуть застосовуватись швидкі й ефективні алгоритми обробки сигналів та підсилення системи;
- *Систематичні похибки:* Ці похибки виникають внаслідок нелінійності, некоректного калібрування або нелінійних залежностей між вихідним сигналом та змінними параметрами системи. Систематичні похибки можуть бути усунені шляхом правильного коригування та калібрування системи, використанням компенсаційних методів або моделювання системи для попереднього прогнозування похибок;
- *Інструментальні похибки:* Ці похибки виникають внаслідок характеристик та властивостей самого приладу або вимірювального обладнання. Інструментальні похибки можуть бути пов'язані з нелінійністю чутливості, шумами, ефектами зміни температури або недосконалістю самого гравіметра.
- *Методичні похибки:* Ці похибки виникають через неточності або обмеження в самому методі вимірювання або його виконанні. Методичні

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

похибки можуть включати недостатню точність підготовки образців, некоректне розміщення приладу, невідповідність умов вимірювання стандартним умовам або нестабільність вимірювального середовища. Для зниження методичних похибок необхідно удосконалювати методику вимірювання, дотримуватись стандартних процедур та контролювати умови вимірювання;

Розглянемо інструментальні похибки ємнісного одноканального МЕМС гравіметра

Інструментальні похибки одноканального МЕМС гравіметра включають поріг чутливості, порушення лінійності, гістерезис у пружних елементах та температурну залежність параметрів і характеристик. [28,29].

Формула перетворення у напругу:

$$U_{\text{вих}} = \frac{d_{ij} \cdot m \cdot g_z}{C_{\text{ЄЄ}}}, \quad (5.28)$$

Де  $U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга,

$d_{ij}$  – модуль,

$g_z$  – ПСТ

$m$  – маса.

Отже, ПСТ  $g_z$  знаходимо за формулою:

$$g_z = \frac{U_{\text{вих}} \cdot C_{\text{ЄЄ}}}{d_{ij} \cdot m}, \quad (5.29)$$

Відносна похибка вихідного сигналу обчислюється як сума відношень відносних похибок параметрів МЕМС ЄГ до їх ступеневих показників[27].

$$\frac{\Delta g_z}{g_z} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} + \frac{\Delta C_{\text{ЄЄ}}}{C_{\text{ЄЄ}}} - \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\Delta m}{m}, \quad (5.30)$$

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Похибка зміни модуля, матеріал ЧЕ – кремній. Зі зміною температури залежність модуля описується законом[30]:

$$\Delta d_{ij} = d_{ij} \cdot \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t, \quad (5.31)$$

$\Delta t$ - зміна часу,  $\alpha_{\text{стр}}$  – темп. коефіцієнт лінійного розширення,

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

$$\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} = \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t, \quad (5.32)$$

$$\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} = 0,59 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,59 \cdot 10^{-6}, \quad (5.33)$$

Похибка зміни  $C_{\text{EE}}$ :

$$C_{\text{EE}} = \frac{\varepsilon \cdot S}{h_n}, \quad (5.34)$$

Де,  $h_n$ - висота ЄГ МЕМС,

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

$S$  – площа.

Похибка зміни  $\Delta \varepsilon$ :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-5}, \quad (5.35)$$

Похибка зміни  $\Delta S$ :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{0,005 \cdot 10^{-8}}{2,3 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,0015 \cdot 10^{-8}}{2,3 \cdot 10^{-7}} = 0,65 \cdot 10^{-4}, \quad (5.36)$$

$S = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  – площа ємнісного МЕМС гравіметра.

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

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Похибки зміни висоти Ємнісного МЕМС гравіметра:

При  $\Delta h_n$  0,3 мкм[30].

$$\frac{\Delta h_n}{h_n} = \frac{0,3 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0,00006 = 0,6 \cdot 10^{-4}, \quad (5.37)$$

Сумарна похибка зміни  $C_{\text{ЄЄ}}$  [27]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{\text{ЄЄ}}}{C_{\text{ЄЄ}}} &= \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta h_n}{h_n} = \\ &= 1 \cdot 10^{-5} + 0,65 \cdot 10^{-4} - 0,6 \cdot 10^{-4} = 0,15 \cdot 10^{-4}, \end{aligned} \quad (5.38)$$

Похибка зміни густини ємнісного гравіметра[30]:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha_{\text{стр}} \cdot \Delta t = 0,59 \cdot 10^{-6} \cdot 1, \quad (5.39)$$

Похибка зміни об'єму ємнісного гравіметра[30]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0,65 \cdot 10^{-4} + 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,25 \cdot 10^{-4}, \quad (5.40)$$

Похибка зміни об'єму ємнісного гравіметра[30]:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V}{V} = 0,59 \cdot 10^{-6} + 1,25 \cdot 10^{-4} = 1,84 \cdot 10^{-4}, \quad (5.41)$$

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

Похибка зміни напруги ємнісного гравіметра:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}} &= \frac{\Delta g_z}{g_z} - \frac{\Delta C_{\text{ЄЄ}}}{C_{\text{ЄЄ}}} + \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} + \frac{\Delta m}{m} = \\ &= 0,01 \cdot 10^{-4} - 0,15 \cdot 10^{-4} + 0,59 \cdot 10^{-6} + 1,84 \cdot 10^{-4} = 1,7 \cdot 10^{-4}, \end{aligned} \quad (5.42)$$

Інструментальна похибка для двоканального МЕМС ЄГ [12,27]:

$$U_1 = k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i), \quad (5.43)$$

$$U_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i), \quad (5.44)$$

					<i>ДІПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $U_1$  та  $U_2$  – вихідні електричні сигнали 1 та 2 каналу;

$m$  – вага інерційної маси;

$k$  – електрична стала[30].

Шляхом сумування сигналів  $U_1$  та  $U_2$  отримується вихідний сигнал, що дозволяє усунути похибки, які виникають внаслідок вертикального прискорення  $\Delta \ddot{i}$  та інструментальних похибок  $\Delta i$ . Таким чином, похибка двоканального МЕМС гравіметра значно нижча, ніж у випадку одноканального гравіметра.

### 5.9 Висновок до п'ятого розділу

Розглянуто коливальну систему ємнісного гравіметра та отримали математичну модель МЕМС . Визначили рівняння руху ДЄГ у складі НК. а Знайдено загальну передаточну функцію. Наведено функціональну схему та конструкцію ємнісного двоканального МЕМС акселерометра. Розглянули класифікацію похибок ДЄГ. доведено відсутність інструментальних похибок ДЄГ МЕМС гравіметра.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 6

### АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА

Автоматизована система стабілізації входить до складу безпілотного літального апарату (БПЛА).

Автоматизована система стабілізації (СС) зображена на рис 6.1.[12].

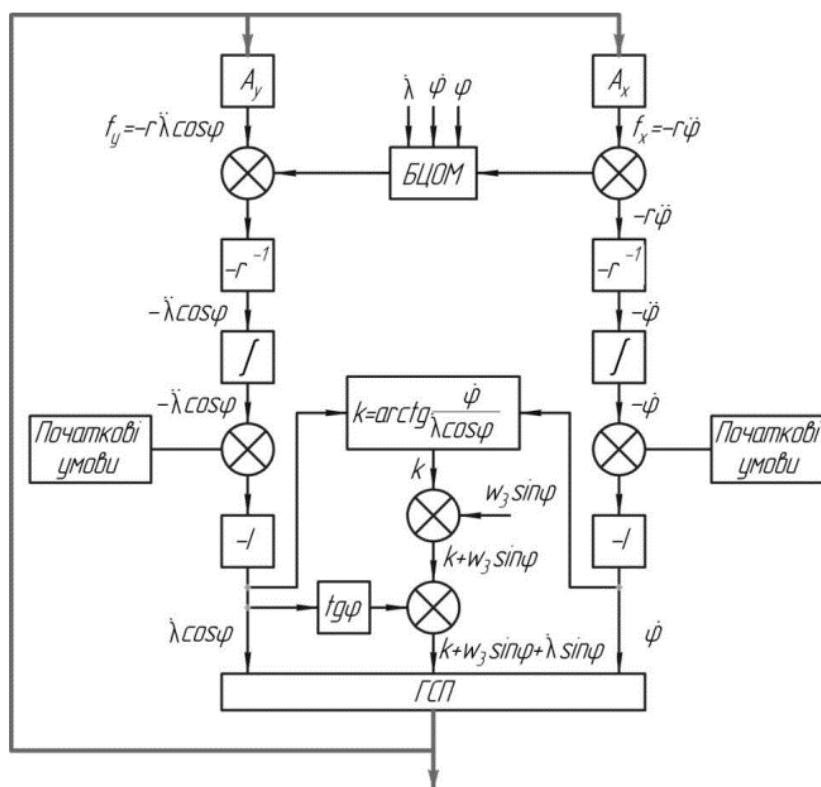


Рис 6.1 - Блок-схема системи стабілізації [12].

У складі безпілотного літального апарату (БПЛА) встановлюється двоканальний ємнісний MEMS гравіметр (ДЕГ), який призначений для вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ). Система стабілізації (СС АГС) забезпечує синхронізацію вимірювальної осі ДЕГ з вертикальним напрямком. ДЕГ розміщений на горизонтальній стабілізованій платформі, що складається з двох лінійних акселерометрів та спеціальних двигунів [1]. Глобальна система позиціонування (ГСП) орієнтується у географічній системі координат, з асоційованими осями чутливості акселерометрів спрямованими на північ та схід. Вихідні сигнали акселерометрів позначаються як  $f_y$  та  $f_x$ .

					Арк
					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	67

$$f_x = -(2\dot{r}\dot{\varphi}_c + r\ddot{\varphi}_c)\cos\chi + (\ddot{r} - r\dot{\varphi}_c^2)\sin\chi - 2r\omega_3\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi + \aleph g \quad (6.1)$$

$$f_y = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3\sin\varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda}\sin\varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda}\cos\varphi_c - r\ddot{\lambda}\cos\varphi_c - 2\dot{r}\omega_3\cos\varphi_c - v g, \quad (6.2)$$

У гравіметрії, кут  $\aleph$  між нормаллю до еліпсоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, яка перпендикулярна площині меридіана, визначається як кут  $\varphi$ . Крім того, кут  $v$  вимірюється між нормаллю до геоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, яка також перпендикулярна площині меридіана. Зауважимо, що  $\varphi$  представляє географічну широту,  $\varphi_c$  - геоцентричну широту,  $\chi$  - відхилення від вертикалі, а  $\lambda$  - довгота місця.

Після отримання сигналів, вони поступають до блоку керування (БК), де формуються сигнали для керування двигунами. Ці сигнали спрямовані на встановлення глобальної системи позиціонування (ГСП) в точне нульове положення. Якщо ГСП була належним чином налаштована в вертикальне положення, то горизонтальні компоненти прискорення сили тяжіння (ПСТ) будуть дорівнювати нулю. З урахуванням величини прискорення сили тяжіння  $g = -v g = 0$ , блок керування (БК) буде компенсувати ці складові:

$$f_x \rightarrow 0 = 2r\omega_3\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi - r\dot{\lambda}\cos\varphi_c\sin\varphi;$$

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

Якщо не враховувати другорядні складові та припустити, що відхилення від вертикалі дорівнює нулю, то можна отримати наступне [12,17]:

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c, \quad (6.3)$$

$$f_y = -2r\ddot{\lambda}\cos\varphi_c, \quad (6.4)$$

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після виконання певних математичних операцій, таких як множення на  $(r-1)$ , інтегрування та зміна знаку, над сигналами  $f_y$  і  $f_x$ , на виході відповідних каналів отримуємо сигнал  $\dot{\varphi}$  (фі крапка) для керування ГСП відносно осі, спрямованої на північ (x), та сигнал  $\dot{\lambda} \cos \varphi_c$  для керування відносно осі, спрямованої на схід (y) [12,17].

### Висновок до шостого розділу

Побудовано автоматизовану систему стабілізації на яку встановлюється ємнісний чутливий елемент. Система стабілізації НК БПЛА забезпечує збіг вимірювальної осі ДЄГ із довідковою вертикаллю.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						69
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО ГРАВІМЕТРА

### 7.1 Опис випробувальної установки

Для здійснення даного експерименту була розроблена спеціальна експериментальна установка. Принципова схема на рис.7.1. Установка складається з декількох компонентів, а саме: генератор механічних коливань, який є вібростендом і має вбудовані два індукційні перетворювачі для перетворення механічного сигналу на електричний; датчик електричного заземлення, який розташований на самому вібростенді; мікросистема для збору даних; блок підсилювача вихідного сигналу; генератор змінної напруги; та комп'ютер, який використовується для керування та контролю всією системою. Ці компоненти спільно працюють для забезпечення необхідних функцій та вимірювань установки.

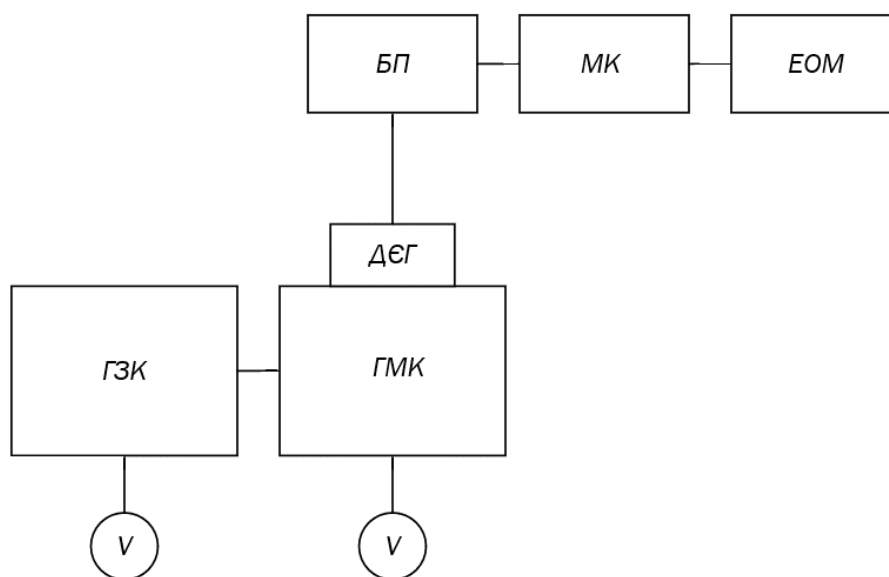


Рис 7.1 – Принципова схема для експериментальної установки ДЄГ

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

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 7.2 Досліджування двоканального ЄГ

В якості ДЄГ МЕМС використано два ємнісних ММА8452Q [12].

## 7.3 Градувальна характеристика двоканального ЄГ

Градування - це процес, в якому засіб вимірювання або вимірювальний прилад налаштовуються за допомогою градувальної шкали або таблиці. Цей процес може виконуватися за допомогою спеціальної установки.

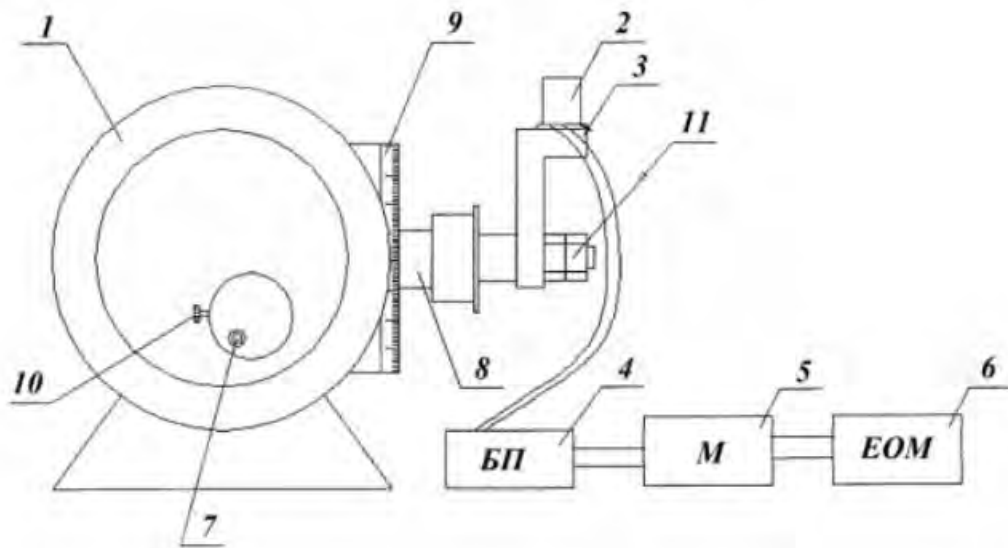


Рис. 7.1 - Експериментальна установка для градування ДЄГ: 1 – оптична ділильна головка; 2 – ДЄГ; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки[7,35]. Градування відбувається при нахиленні вимірювальної осі ДЄГ на деякий заданий кут за допомогою оптичної ділильної головки[12, 29].

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.1 - Градувальна таблиця для ДЄГ НК

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

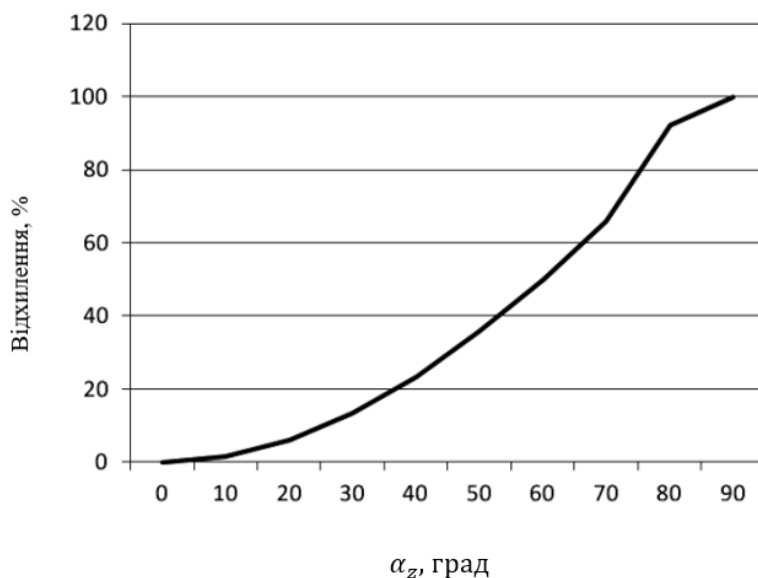


Рис. 7.2 – Графік залежності відхилення вимірювальної осі ДЄГ  $\alpha_z$  від значення поточного прискорення сили тяжіння



З таблиці 7.1 видно, що різниця між відхиленнями вимірювальної осі ДЄГ автоматизованої АГС на кут  $\alpha_z$  обчисленими аналітично і отриманими експериментально не перевищує 0,5 мГал. Кут повороту вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі прямо пропорційно впливає на вихідні покази ДЄГ і величину його похибки.

Оскільки гравіметричні вимірювання проводяться на рухомій основі в просторі, необхідно постійно забезпечувати збіг вимірювальної осі ДЄГ АГС із довідковою вертикаллю. Для досягнення цього запропоновано побудувати систему стабілізації АГС, яка забезпечує допустимий рівень похибки стабілізації осі чутливості ДЄГ у положенні вертикалі в межах 0.5-15 кутів на хв.

#### 7.4 Базові параметри роботи макету

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

Згідно з [12,34], за цими координатами

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

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

$$\gamma_{0КПІ} = 9,78049(1 + 0,0052884 \cdot \sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2(2 \cdot 50.449052)) = 9.81118539 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad (7.1)$$

Гравіметр був установлений в вертикальному положенні. Експерименти проводились на спеціальній вібростенді.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 7.5 Проведення експерименту ДЄГ

Дані були реєстровані та оброблялися за допомогою комп'ютера. Кожні приблизно 10 секунд проводилась автоматична обробка на комп'ютері. Для кожного окремого випадку була визначена систематична похибка  $\Delta g$ .

$$\Delta g = |\overline{g_{\text{експ}}(t)} - \gamma_{\text{ОКП}}|, \quad (7.2)$$

Де,  $\overline{g_{\text{експ}}(t)}$  - середнє значення вихідного сигналу ДЄГ отримане у ході експерименту за період спостереження у 10 с:

$$\overline{g_{\text{експ}}(t)} = \frac{1}{N_{\text{експ}} + 1} \sum_{i=0}^{N_{\text{експ}}} \overline{g(t_i)}, \quad (7.3)$$

Де,  $N_{\text{експ}}$  - кількість вимірів за 50 с,  $\overline{g(t_i)}$  -  $i$ -те значення вихідного сигналу ЄГ.

Абсолютна похибка експериментальних вимірювань  $\Delta g_{\text{експ}}$ :

$$\Delta g_{\text{експ}} = \frac{\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}}}{\sqrt{N_{\text{експ}}}} \cdot t_p, \quad (7.4)$$

$$\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{експ}}} \cdot \sum_{i=0}^{N_{\text{експ}}} [\overline{g(t_i)} - \overline{g_{\text{експ}}}]^2}, \quad (7.5)$$

$$t_p = qt(p, d)$$

Де,  $\sigma_{\overline{g_{\text{експ}}}}$  - середньоквадратичне відхилення  $\overline{g_{\text{експ}}}$ ,  $t_p$  - коефіцієнт оберненого розподілу Стюдента за довірчою імовірністю  $p$  та числом ступенів свободи  $d = N_{\text{експ}}$ .

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.2 - Похибки ДЄГ, зумовлені вібраціями основи

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

При нульових установках вібростенду визначено, що вихідний сигнал ДЄГ складає приблизно 0.00006 мГал і збігається з довідковими значеннями ПСТ. Для поступальних вібрацій до 10 рад/с точність вимірювань ДЄГ складає 0.5 мГал.

Згідно з джерелами [12,29] та результатами моделювання, спостерігається можливість виникнення резонансного режиму на наступних частотах:  $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$  рад/с. Чим нижча резонансна частота, тим менші амплітуди вібраційних поступальних збурюючих прискорень спостерігаються, оскільки спектр збурюючих вібраційних поступальних прискорень має свій максимум при частоті 1640 рад/с. Розрахункові результати показують, що навіть при виникненні резонансного режиму, вимірювання здійснюються з високою точністю і похибки ДЄГ залишаються незначними, як це показано в таблиці 6.3.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.3 - зумовлені резонансними режимами роботи

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

$$\omega := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.033 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad \Delta g_{\text{ЕКСП}} := \begin{pmatrix} 0.001144 \\ 0.198115 \\ 0.369129 \\ 0.542480 \\ 0.412641 \\ 0.375337 \end{pmatrix} \quad \Delta g := \begin{pmatrix} 0.000060 \\ 0.126387 \\ 0.204864 \\ 0.485575 \\ 0.320258 \\ 0.210509 \end{pmatrix}$$

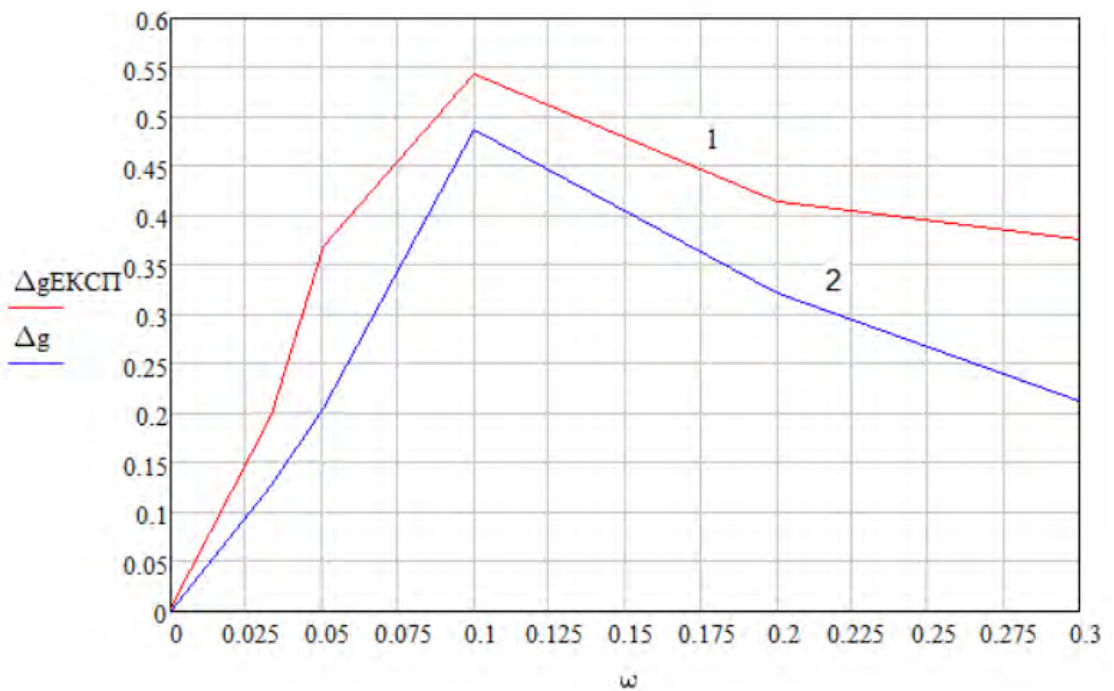


Рис. 7.3 – Результати цифрового моделювання та експерименту. 1 – цифрове моделювання, 2 – експеримент.

Експериментальні результати, які наведені у таблиці 6.3, відповідають теоретичним розрахункам, що підтверджується графіком на рисунку 6.4. Вимірні значення максимально наближені одне до одного, що можна пояснити тим, що використане обладнання не є ідеальним для таких випробувань. З графіків видно, що найгіршими результатами є ті, які відповідають частоті 0,1 рад/с, оскільки в цій точці похибка досягає свого максимального значення, проте вона залишається в межах заданої точності, що становить 0,5 мГал.

#### 7.6 Визначення метрологічних характеристик ДЄГ

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

$$\bar{g}_{ДЕГ} = \bar{g}_{ДЕГ} \pm 6 \cdot 10^{-5} \text{ мГал}, \quad (7.6)$$

Враховуючи наявність динамічних збурень ДЄГ може забезпечувати високу точність вимірювання.

$$\bar{g}_{ДЕГНК} = \bar{g}_{ЕКСП} \pm 0,5 \text{ мГал}, \quad (7.7)$$

Похибка ДЄГ у складі НК:

$$\delta_g = \frac{\Delta g}{\bar{g}_{ЕКСП}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{981102.37453} \cdot 100\% = 5,1 \cdot 10^{-5} \%, \quad (7.8)$$

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновок до сьомого розділу

У результаті проведеного експериментального дослідження лабораторної установки для вимірювання ДЄГ було отримано наступні результати. Виявлено, що кут нахилу вимірювальної осі ДЄГ відносно довідкової вертикалі має прямопропорційний вплив на вихідні характеристики та величину похибки. Крім того, експериментально була встановлена похибкавимірювання ДЄГ. При резонансних умовах (при частотах  $\omega_0 = 0,033; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$  рад/с), похибка ДЄГ була меншою за 0,5 мГал. Найбільша похибка вимірювання ДЄГ спостерігалася при частоті  $\omega_0 = 0,1$  рад/с, проте ця похибка не залежить від точності вимірювань.

Результати експериментального дослідження показують, що вимірювання ДЄГ за допомогою розробленої лабораторної установки може бути здійснено з задовільною точністю, з максимальною похибкою менше 0,5 мГал, навіть при резонансних умовах.

					ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ	Арк
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

У даній дипломній роботі проведено дослідження двоканального МЕМС ЄГ-чутливого елементу, який має велике значення для системи стабілізації безпілотних літальних апаратів. В ході дослідження було здійснено пошук та аналіз патентних даних стосовно відомих гравіметрів. Виявлено, що доступні гравіметри, які можна знайти відкритою інформацією, не забезпечують достатню точність для використання на автоматизованих навігаційних комплексах.

Одноканальний емісійний гравіметр, має лінійну вихідну характеристику, відносно високу чутливість та стабільність показань, має деякі недоліки, такі як невелика отужність вихідного сигналу, шуми, недостатня точність в 1 мГал та наявність залшкових похибок. Основним недоліком одноканального ЄГ є вплив вертикального прискорення та інструментальні похибки.

Новий двоканальний емісійний гравіметр, який використовує два симетричні одноканальних ЄГ, майже повністю усуває вплив вертикального прискорення та зовнішніх фізичних факторів. Це дозволяє збільшити точність в 2 рази порівняно з відомими авіаційними гравіметрами до 0,5 мГал. Використання МЕМС-технологій у виробництві цього приладу має велике значення, оскільки воно дозволяє зменшити розмір перетворювачів, підвищити точність, знизити споживання енергії, забезпечити високу технологічність і низьку вартість при масовому виробництві. Тому двоканальний емісійний МЕМС гравіметр є точним, функціональним та сучасним елементом автоматизованого навігаційного комплексу.

					<i>ДПБ. ПМ91.02.1760.001 ПЗ</i>	Арк
						79
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] [https://uk.wikipedia.org/wiki/Історія\\_безпілотних\\_літальних\\_апаратів](https://uk.wikipedia.org/wiki/Історія_безпілотних_літальних_апаратів)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F\\_%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D1%96%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B8%D1%85\\_%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D1%85\\_%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%96%D0%B2](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F_%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D1%96%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%96%D0%B2).

[2] Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. Б.П. Книш, Я.А. Кулик, М.В. Барабан. УДК 269.7.01

[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018\\_3/jrn/pdf/42.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_3/jrn/pdf/42.pdf)

[3] "Сокіл-300" від КБ "Луч": на що здатний український ударний БПЛА

[https://defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/sokil\\_300\\_vid\\_kb\\_luch\\_na\\_scho\\_zdatnij\\_ukrajinskij\\_udarnij\\_bpla\\_foto-2008.html](https://defence-ua.com/weapon_and_tech/sokil_300_vid_kb_luch_na_scho_zdatnij_ukrajinskij_udarnij_bpla_foto-2008.html)

[4] КВАДРОКОПТЕР DJI MAVIC 3T

<https://dronecenter.ua/kvadrokopter-dji-mavic-3t>

[5] Фото мультироторного дрона

<https://ifarming.com.ua/upravlinnia/rol-tehnologiyi-droniv-u-stalosti-fermerstva>

[6] Фото однороторного дрона

[7] <https://www.windform.com/case-studies/3d-printed-uav-tail-rotor-gear-box-housing-flyingcam/Гібридні>

[8] Фото гібридні БПЛА

<https://focus.ua/uk/digital/565205-inzheneri-rozrobili-evtol-iz-nezvichajnimi-krilami-u-chomu-sekret-pristroyu>

[9] Фото БПЛА з фіксованим крилом



[https://defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/smert\\_z\\_neba\\_vijskovi\\_eksperti\\_pro\\_mozhливosti\\_bayraktar\\_tb2\\_u\\_borotbi\\_z\\_rosijeju-7062.html](https://defence-ua.com/weapon_and_tech/smert_z_neba_vijskovi_eksperti_pro_mozhливosti_bayraktar_tb2_u_borotbi_z_rosijeju-7062.html)

[10] Будова дрона

<https://aeromind.pl/Budowa-drona-ccms-pol-52.html>

[11] Types of multirotor propeller

<https://www.mdpi.com/2504-446X/6/11/330>

[12] Хильченко Т.В. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: дис. ... канд. техн. наук. : 05.11.01 –прилади та методи вимірювання механічних величин / Т.В. Хильченко. Одеса, 2019. – 228 с.

[13] Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння: пат. 105122 Україна: МПК G01V 7/00 / Безвесільна О. М., Ткачук А.Г., Козько К. С. – заяв. 01.04.13; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. – 5 с.

[14] Безвесільна О.М. Аналіз основних типів гравіметрів АГС / О.М. Безвесільна, Л.О. Чепюк // ВІСНИК ЖДТУ. 2013. № 3 (66), с. 52-61.

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

[16] Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння: пат. 105122 Україна: МПК G01V 7/00 / Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Козько К. С. – заяв. 01.04.13; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24. – 5 с.

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

[18] Козько К. С. Ємнісний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: дис... канд. техн. наук. : 05.11.01 – прилади та методи

вимірювання механічних величин / Костянтин Сергійович Козько. - Київ, 2016.  
- 223 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15358>

[19] UVS International = Міжнародної асоціації безпілотних систем

[Електронний ресурс]. – Режим доступу :

[http://uvsinternational.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=204&Itemid=284](http://uvsinternational.org/index.php?option=com_content&view=article&id=204&Itemid=284)

[20] Сучасні гравіметри авіаційної гравіметричної системи О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук, Л. О. Чепюк, К. С. Козько, 2015. УДК: 621.317. Режим доступу: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/103656>

[21] Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень/ О.М. Безвесільна. –К.: Либідь, 2001. –261 с.

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

[23] Веселов, К. Е. Гравиметрическая разведка / К. Е. Веселов. – М.: Недра, 1968.– 512 с.

[24] Gramert, W. R. Third generation aerogravity system // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly –Boulder, Colorado, 1995.

[25] Wei, M. Analysis of GPS-derived acceleration from airborne tests / M. Wei, K. Schwarz // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, – Boulder, Colorado, 1995.

[26] Годовицын И.В. Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра / И.В. Годовицын, Д.А. Сайкин, Р.А. Федоров, В.В. Амеличев // Проблемы разработки перспективных

микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 642- 647.

[27] Безвесільна О. М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріорітети», 2017. – 181 с

[28] Безвесільна О.М., Козько К.С., Тимчик Г.С., Чепюк Л.О. Прецизійний чутливий елемент автоматизованої інформаційновиміральної системи. Житомир : ЖДТУ, 2017. 208 с

[29] Іващенко, О. А. Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача: магістерська дисертація: 152 Метрологія та інформаційновимірвальна техніка / Іващенко Олена Андріївна. - Київ, 2018. - 127 с.

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

[31] Resolution of the 3rd CGPM. URL: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/3/2/>. 15.10.2016. Zahl. s screen.