

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

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизації та комп'ютерно інтегровані технології»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Юрій, КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Тесленку Денису Володимировичу**

1. Тема дисертації «Автоматизований двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент стабілізатора», науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., про., затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. № 5188-с
2. Термін подання студентом дисертації 01.01. 2024 р.
3. Об'єкт дослідження ємнісний двоканальний МЕМС чутливий елемент, що забезпечує оптимальну стабілізацію
4. Вихідні дані ємнісний МЕМС акселерометр, обладнання для проведення експериментальних досліджень
5. Перелік завдань, які потрібно розробити Анотація укр. та англ. мовами. Список умовних позначень та скорочень. Вступ. Розглянути поняття стабілізатора озброєння. Принцип роботи та особливості його роботи. Основні функції та призначення. Розглянути конструкцію чутливого елемента системи стабілізації, його принцип дії. Описати автоматизований двоканальний ємнісний МЕМС ЧЕ стабілізатора. Надати математичний опис принципу роботи ємнісного МЕМС ЧЕ. Надати інформацію щодо дослідження двоканального ємнісного МЕМС акселерометра. Розробити стартап проєкт на дану тему. Загальний висновок. Список літератури. Додатки.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу формат А1 - Структурна схема автоматизованої системи стабілізації озброєння 1 арк.; формат А1 - Блок-схема автоматизованої системи стабілізації з ЄЧЕ 1 арк.; формат А1 - Типи конструкцій ємнісного перетворювача 1 арк.; формат А1 -

Принципова схема дослідної установки 1 арк.; формат А1 - Триосьовий ємнісний акселерометр автоматизованої системи стабілізації - 1 арк.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Безвесільна О.М., Толочко Т.О., Тесленко Д.В. Основні конструктивні різновиди ємнісного перетворювача // Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці: тези доповідей учасників Всеукраїнської науково-практичної онлайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (20-21 травня 2023р.). Житомир: ЖНАЕУ, 2023. С. 104-105.

8. Консультанти розділів дисертації\*

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

9. Дата видачі завдання 28 вересня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури за темою	28.09.2023	
2	Огляд та розробка принципової схеми	20.10.2023	
3	Огляд та розробка структурної схеми	30.10.2023	
4	Опис математичної моделі пристрою	05.11.2023	
5	Виконання експериментальних та розрахункових досліджень	10.11.2023	
6	Розробка стартап-проєкту	15.11.2023	
7	Оформлення текстової та графічної частини	27.11.2023	
8	Передача матеріалів МД на перевірку науковому керівнику	08.01.2024	
9	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості	09.01.2024	
10	Представити МД на рецензію	10.01.2024	
11	Представити МД на затвердження зав. кафедри	11.01.2024	
12	Розробка презентації та узгодження її з керівником МД	11.01.2024	
13	Передача електронної версії МД до бібліотеки	11.01.2024	
14	Представити МД до екзаменаційної комісії	18.01.2024	

Студент

Денис, ТЕСЛЕНКО

Науковий керівник

Олена, БЕЗВЕСІЛЬНА

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

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить наступні складові: список умовних позначень та скорочень, вступ, п'ять основних розділів, загальні висновки та список посилань на використану літературу. Містить 83 сторінки, 18 рисунків, 28 таблиць, 19 посилань.

**Мета і задача дисертації.** Проведення дослідження двоканального ємнісного МЕМС чутливого елемента *на основі автоматизованої системи стабілізації*.

### **Задачі дисертації включають:**

1. Розкриття змісту та сутності *системи стабілізації*, галузі використання систем стабілізації;
2. Визначення функціональних складових системи стабілізації та призначення чутливих елементів у їх будові;
3. Огляд методів та засобів забезпечення стабілізації;
4. Розгляд особливостей ємнісного чутливого елемента (ЧЕ). Введення поняття забезпечення оптимальної точності та принцип двоканальності;
5. Розгляд типової конструкції ємнісного МЕМС чутливого елемента;
6. Метод вимірювання ємнісного чутливого елемента. Математичне обґрунтування;
7. Опис математичної моделі ємнісного ЧЕ;
8. Опис конструктивних різновидів ємнісного ЧЕ;
9. Визначення потужності вихідного сигналу. Чутливість ємнісного ЧЕ;
10. Наведення даних щодо експериментальних досліджень та засобів їх проведення;
11. Розробка стартап-проєкту на базі розглянутої автоматизованої системи стабілізації.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження виступає процес забезпечення стабілізації шляхом використання двоканального ємнісного МЕМС чутливого елемента.

**Предмет дослідження.** Предметом дослідження виступає двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент.

**Практичне значення результатів:**

1. Розглянуто особливості МЕМС ЄЧЕ, його характеристики, використання та практичність застосування;
2. Розглянуто базові конструкції ЄЧЕ і особливості вихідного сигналу;
3. Розглянуто принцип використання двоканальності для забезпечення високої точності.

**Публікації.** Опубліковано тези конференції.

**Ключові слова:** ємнісний чутливий елемент, МЕМС, система стабілізації, двоканальний ЧЕ, автоматизація

## ABSTRACT

The master's thesis contains the following components: a list of notations and abbreviations, an introduction, five main chapters, general conclusions and a list of references to the literature used. Contains 83 pages, 18 figures, 28 tables, 19 references.

**The aim and task of the dissertation.** Conducting a study of a two-channel capacitive MEMS sensitive element based on an automated stabilization system.

### **Dissertation tasks include:**

1. introduction to the concept of stabilization, description of use and areas of application;
2. determination of the functional components of the stabilization system and the importance of sensitive elements in their structure;
3. review of stabilization methods and means;
4. consideration of the features of the capacitive converter. Introduction of the concept of ensuring optimal accuracy and the principle of two-channel;
5. consideration of a typical design of a capacitive MEMS converter;
6. mathematical justification of the capacitive sensitive element measurement method;
7. description of the mathematical model of the capacitive type accelerometer;
8. description of structural types of capacitive converter;
9. determination of output signal power and capacitance converter sensitivity;
10. providing data on experimental research and means of conducting it;
11. development of a startup project based on the considered automated stabilization system.

**Object of study.** The object of the research is the process of ensuring stabilization by using a two-channel capacitive MEMS sensitive element.

**Subject of study.** The subject of the study is a two-channel capacitive MEMS sensitive element.

### **Practical significance of the results:**

1. the peculiarities of the ECHE MEMS, its characteristics, use and practicality of application are considered;

2. the basic designs of ECHE and features of the output signal are considered;
3. the principle of using dual-channel to ensure high accuracy is considered.

**Publications.** One thesis of the conference has been published

**Keywords:** capacitive sensitive element, MEMS, stabilization system, two-channel CE, automation

## СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ССО - система стабілізації озброєння;

ПСКН - пристрій стабілізації кута нахилу;

ЛБМ - легкі броньовані машини

ЧЕ - чутливий елемент;

ЄЧЕ - ємнісний чутливий елемент;

ГСП - гіростабілізована платформа;

БЦОМ - бортова цифрова обчислювальна машина;

МЕМС - мікро електромеханічна система;

ГІІП - гіроскопічний інтегратор лінійних прискорень;

мГл - одиниця прискорення в системі одиниць СГС;

ЄП - ємнісний перетворювач;

ГМК - генератор механічних коливань;

ЕОМ - електронна обчислювальна машина;

ІІ - індукційний перетворювач

## ВСТУП

Забезпечення високої точності завжди було і є ключовим фактором у веденні прицільної стрільби. Особливо актуальність її забезпечення зросла з моменту створення та подальшого розвитку галузі броньованої техніки, яка повинна була швидко пересуваючись і зазвичай по нерівній поверхні забезпечуючи можливість ведення стрільби з певною точністю.

Точність стрільби дуже часто вирішує успіх чи невдачу в будь-якій ситуації, наприклад при проведенні військових операцій на полі бою тощо. Саме для цього були розроблені системи стабілізації озброєння, які вирішують проблему підтримки стабільності та точності стрільби у різних умовах та ситуаціях.

Система стабілізації озброєння (ССО) - це технологічні рішення, спроектовані для забезпечення стабільності та високої точності ведення стрільби з різних видів озброєння. Вони можуть бути встановлені на рухомих платформах, транспортних засобах, дронах або навіть на стаціонарних вишках. Основна мета ССО - компенсувати будь-які незважаючи на обставини фактори, які можуть впливати на точність стрільби, такі як рух, вібрації, коливання, вітер та інші впливи навколишнього середовища.

У цій магістерській дисертації буде розглянуто основні аспекти систем стабілізації озброєння, включаючи їх функції, технічні рішення, інтеграцію з іншими системами, та їх важливість у різних областях застосування.

Також буде розглянуто ключові характеристики, які повинні бути забезпечені сучасними ССО для досягнення максимальної ефективності та точності у веденні прицільної стрільби.

Також у цій роботі буде розглянуто технічні засоби та складові, які призначені забезпечити роботу таких систем, наприклад акселерометри.



# **РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ СТАБІЛІЗАТОРА ОЗБРОЄННЯ. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО РОБОТИ. ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ**

## **1.1. Поняття системи стабілізації озброєння**

Система стабілізації озброєння - це спеціальний комплекс поєднаних у загальну систему пристроїв, який призначений для виконання стабілізації зброї у русі. Такого роду системи використовуються задля того, щоб підвищити точність прицілювання та відповідно стрільби, для різного типу транспорту. Дана робота присвячена розгляду ССО для використання на легко броньованій техніці. ССО зазвичай включені до загальної системи керування вогнем.

Легко броньована техніка зазвичай призначається для швидкого переміщення на великі дистанції, перевезення людей, прикриття військових підрозділів, штурмових та оборонних дій, тому точність наведення відіграє важливу роль для якісного виконання задач, та в принципі надання можливості їх виконання.

Сучасні стабілізатори озброєння повинні мати можливості для забезпечення ведення ефективної прицільної стрільби з різного роду військової техніки у горизонтальних та вертикальних площинах. ССО повинні забезпечувати в першу чергу надійність та ефективність стабілізації ведення прицільного вогню в різних ситуаціях і під впливом різного роду негативних факторів, таких як вібрація що може виникати в процесі пересування транспортного засобу.

## **1.2. Основні функції ССО**

Системи стабілізації [1, 14, 15] озброєння призначені для виконання переліку функцій, які забезпечують точність стабілізації зброї, до них відносять наступні:

1. Корекція положення - ССО вбудовані в системи озброєння та прицільні пристрої призначені для визначення та корегування положення для її підтримки враховуючи різні фактори;

2. Компенсація руху - під час руху платформа на якій встановлено озброєння піддається негативним впливам, таким як вібрації, тремтіння, вплив нерівності поверхні по якій відбувається рух. Тому такі системи повинні вміти визначати цей вплив та враховувати коригувальні коефіцієнти для підтримки бойового модуля в необхідній позиції;

3. Автоматичний приціл - може мати в складі системи для корегування та автоматичного встановлення прицілу на основі певного параметра, наприклад на основі випромінювання;

Забезпечення точності прицільної стрільби - основний параметр роботи і показник ефективності конкретної ССО. Електронні стабілізатори повинні забезпечити максимально точну стабілізацію та підтримку прицілювання в русі.

Ці функції зазвичай реалізовані за допомогою сучасних електронних інерціальних вимірювальних пристроїв, обчислювальних блоків, алгоритмів та механічних систем безпосереднього забезпечення стабілізації модуля. Відповідно точність залежить від використовуваних чутливих елементів.

Також задля забезпечення функціональності системи стабілізації озброєння повинно бути забезпечено такі аспекти:

1. Інтеграція з іншими системами, наприклад системи наведення, нічного бачення тощо;

2. Сумісність з різними видами озброєння та оптики;

3. Висока точність і швидкість реакції;

4. Інтерфейс для оператора, що дозволить легко керувати системою в цілому.

Системи стабілізації озброєння є важливими компонентами та складовими бойових модулів для досягнення високої точності та ефективності прицільної стрільби у різних сферах застосування, зокрема для легкоброньованої техніки.

Їх основні функції включають стабілізацію платформи, корекцію траєкторії, автоматичне наведення, інтеграцію з іншими системами, забезпечення надійності та стійкості до впливів навколишнього середовища. Вони також можуть працювати під час руху та використовувати інноваційні технології для підвищення точності стрільби. Розумна інтеграція та сумісність ССО з іншими компонентами дозволяє підвищити їх ефективність та можливості, забезпечуючи комплексне та надійне рішення для досягнення поставлених цілей.

### **1.3. Технічна реалізації ССО**

Стабілізатор озброєння складається з наступних основних елементів:

1. Пристрій стабілізації кута нахилу зброї (ПСКН), який відповідає за збереження горизонтального положення зброї під час її руху. Це може бути рухома платформа з гіроскопічними приладами або електромеханічними чутливими елементами.
2. Пристрій стабілізації кута висоти зброї, який забезпечує стабільне вертикальне положення зброї.

Стабілізатор озброєння може бути механічним або електронним. Механічний стабілізатор складається з системи пружин та гідроприводів, що вбудована в платформу озброєння та забезпечує стабільність гармати під час руху техніки [1].

На рис. 1.1 показано структурну схему стабілізатора озброєння.



Рисунок 1.1. Структурна схема стабілізації озброєння [2]

Якщо взяти до уваги електронні, то вони як і будь-які системи стабілізації містять у собі набір датчиків, стабілізатор та обчислювальний блок, а також в залежності від типу системи можуть мати додаткові елементи, зокрема якщо мова йде про автоматичні системи ведення вогню.

Під обчислювальним блоком мається система яка здатна приймати дані з датчиків, та відтворювати алгоритм стабілізації, але ССО можуть як мати цей блок так і не мати його, що залежить від типу та принципу роботи кожного стабілізатора.

В системах стабілізації використовуються спеціальні пристрої - гіроскопи та акселерометри. Ці пристрої призначені для визначення даних щодо руху та прискорення, на основі чого відбувається процес стабілізації. На основі цих даних відбувається компенсація відхилень від статичної заданої позиції, завдяки чому бойовий модуль, наприклад гармата, може вести прицільну стрільбу в русі.

Гіроскопи призначені для вимірювання кутової швидкості обертання навколо визначеної осі, у даному випадку визначає рух гармати, враховуючи різні фактори, наприклад рух бойової машини, нерівномірність поверхні тощо.

На основі цих даних ССО може корегувати положення бойового модуля компенсуючи будь-який небажаний рух. Гіроскопи надають можливість зберігати стабільність керування озброєнням під час руху та нахилу платформи.

Акселерометри призначені для вимірювання прискорення, що надає можливість визначити, наскільки озброєння або прицільний пристрій рухаються в просторі і виявляти присутність впливу зовнішніх сил та вібрацій.

Вони необхідні для того, щоб надати системі ССО можливість виявляти рух, вібрації та корегувати (компенсувати) їх вплив на позиціонування бойового модуля.

Стабілізатор озброєння представляє собою систему яка безпосередньо виконує стабілізацію, у даному випадку зброї, та представляє собою поєднання вимірюваних пристроїв, алгоритмів та стабілізуючих пристроїв для забезпечення стабільного позиціонування враховуючи зовнішні фактори.

Стабілізатор часто має вбудований обчислювальний блок або мікроконтролер, який призначений для обробки даних з датчиків (наприклад акселерометра та гіроскопа) та застосовує спеціальні алгоритми для обчислення коефіцієнта корекції для стабілізації.

Пристрій стабілізації кута нахилу зброї (ПСКН) є електромеханічним пристроєм, який використовується для збереження стійкого кута нахилу зброї під час стрільби.

Основним завданням ПСКН є забезпечення точності стрільби та збільшення ефективності зброї. Основними елементами ПСКН є [1]:

- датчики, які вимірюють кут нахилу ствола та швидкість його руху;
- електронні блоки, які обробляють сигнали від датчиків та формують вихідний сигнал для приводів стабілізатора;
- приводи, які забезпечують рух стабілізатора.

## 1.4. Питання інтеграції та сумісності

Системи стабілізації як і будь-які інші системи мають на меті можливість впровадження в конфігурації визначених типів, та можливість працювати спільно з певним переліком компонентів.

Відповідно рівень сумісності визначає можливості застосування тих чи інших типів ССО.

З приводу інтеграції та сумісності можна виділити декілька наступних складових:

1. Інтеграція з типом озброєння - визначає тип озброєння для якого можна застосовувати певний тип ССО і для яких вона може забезпечити коректну стабілізацію та корекцію;

2. Сумісність з датчиками та сенсорами - визначає певний тип сенсорів та датчиків, які можуть бути використані для сумісної роботи з ССО і забезпечувати якісну і точну роботу системи;

3. Інтеграція з системами наведення - визначає можливості ССО працювати з певними типами систем наведення які використовують у визначеному типу техніки;

4. Технічна інтеграція - визначає можливість технічного впровадження в машину без особливого втручання в конфігурацію та розташування важливих модулів системи або з мінімальним її корегуванням. Цей параметр є важливим так як це напряду впливає на можливість використання певних типів ССО;

5. Адаптація до типів бойових машин - визначає перелік типів бойових машин для яких присутня можливість адаптації під заданий тип ССО.

Ці параметри є дуже важливими і їх необхідно враховувати в процесі розробки та інтеграції систем стабілізації озброєння, так як вони забезпечують:

- максимальну ефективність системи;
- максимальне використання ресурсів;
- зменшення витрат на інтеграцію та створення великої кількості модифікацій;

- підвищують надійність;
- надають можливості щодо подальшого розширення чи модернізації.

У загальному розумінні інтеграція та сумісність є важливими аспектами для досягнення ефективності, надійності та гнучкості в розробці та використанні ССО.

Вони сприяють покращенню продуктивності та забезпечують більше можливостей для вдосконалення функціональності та розвитку систем у майбутньому.

### **1.5. Огляд та аналіз існуючих систем стабілізації озброєння**

Для того, щоб мати можливість визначити напрямок розвитку та проведення подальшого опису та аналізу варто розглянути існуючі бойові модулі, які були розроблені та використовуються у сучасних бойових машинах, та їх загальні параметри.

Українськими підприємствами розроблено велику кількість бойових модулів та стабілізаторів до них, які за основними показниками відповідають кращим світовим зразкам, а за багатьма характеристиками перевершують їх. Українська військова галузь має актуальну тенденцію до стрімкого розвитку. Сьогодні найвідомішими бойовими модулями українського виробництва є [5]:

- «Десна» - дистанційно керований бойовий модуль для катерів та ЛБТ. Озброєння модуля може містити 30-мм гармату ЗТМ-1 або 2, 7, 30-мм автоматичний гранатомет АГ-17, 62-мм спарений кулемет КТ-7,62, протитанкове озброєння;

- «Інгул» - компактний модуль зі значною бойовою потужністю, адаптований для військової техніки типу: БРДМ-2М, БТР-80, БРДМ-2, БТР-70, БТР-7, а також військових катерів з малою водотоннажністю. Озброєння: кулемет КТ-7,62, автоматична гармата ЗТМ-2;

- «Грім» - модуль із винесеним озброєнням, що підвищує рівень безпеки екіпажу та знижує рівень загазованості під час стрільби. Розроблений для

встановлення на легкі бойові машини. Бойова міць представлена гарматою ЗТМ-2, кулеметом КТ-7,62, ракетним комплексом 9П135М, димовою завісою, прицільним комплексом ПНК-4С;

- «БАУ» - одномісний бойовий модуль із дистанційним керуванням, що встановлюється на легку бойову колісну та гусеничну техніку. Бойовий арсенал модуля може містити: 23-мм автоматичні гармати 2А7М зі швидкострільністю 850 пострілів за хвилину, кулемет КТ-7,62 (ПКТ);

- «Дуплет» - модуль, створений для техніки сімейства БМП-2. Як озброєння встановлено: дві 30-мм гармати ЗТМ-1, автоматичний гранатомет АГ-17, 4 пускових установки протитанкових керованих ракет, два спарені кулемети КТ-7,62;

- «Стилет» - універсальний бойовий модуль, що застосовується під час модернізації бронетранспортерів та БМП-1У. Зброя, що встановлюється на модуль: гармата ЗТМ-2, протитанкове кероване озброєння, кулемет КТ-7,62, гранатомет АГ-17;

- «Парус» - модуль із дистанційним управлінням. Гарантує високу безпеку екіпажу бойових машин за рахунок винесеного озброєння і боєкомплекту. Зброя, якою комплектується модуль: гармата КБА-1, автоматичний гранатомет 30-мм, комплекс керованого озброєння «Бар'єр», кулемет КТ-7,62;

- «Штурм» - компактний, найпотужніший бойовий модуль свого класу, володіє стабілізацією озброєння у двох площинах. Бойове оснащення дозволяє вражати наземну техніку, живу силу та гелікоптери противника. Вогнева міць: гармата ЗТМ-1, кулемет КТ-7,62, гранатомет КБА-117, комплекс «Бар'єр» з бронебійними ракетами та інше.

Низка наведених різновидів бойових модулів є свідченням того, що велика кількість розробників шукає способи реалізації сучаснішої системи стабілізації для різного типу озброєння та для різних особливостей застосування враховуючи сучасні потреби промисловості.



Інтеграції систем стабілізації в бойові модулі є ключовим аспектом для досягнення високої точності. Тому пошук вдосконалення рішень систем стабілізації і їх реалізація є дуже важливим питанням у сфері приладобудування.

## **1.6. Використання акселерометрів в системах стабілізації озброєння**

Акселерометри використовуються для вимірювання статичного прискорення, динамічного прискорення, вібрацій об'єкта. На сучасних літаках, ракетах, супутниках, машинах і космічних кораблях акселерометри застосовуються в автопілотах для поліпшення характеристик стійкості і керованості об'єкту, а також використовуються як індикатори площини горизонтування гіростабілізованих платформ і інших пристроїв. В системах інерціальної навігації, акселерометри є найважливішими елементами, тому їх розробці та виготовленню пред'являються дуже високі вимоги. Вони повинні мати високі точність і чутливість, великий діапазон вимірюваних прискорень і лінійність характеристики, стабільність показань і нечутливість до вібраційних і ударних дій, до зміни температури і тиску навколишнього середовища [4].

Наразі існує багато видів акселерометрів: ємнісні, струнні, п'єзоелектричні та інші. Всі вони відрізняються за такими параметрами, як чутливість, діапазон вимірювань, стійкість до впливу зовнішніх факторів, габарити, собівартість та інші [4].

Акселерометри в системах стабілізації озброєння відіграють важливу роль у вимірюванні та компенсації рухів і вібрацій платформи, на якій розташована зброя або оптика. Акселерометри призначені для:

1. Вимірювання прискорення - акселерометри вимірюють прискорення, яке діє на платформу, що включає в себе будь-які зміни швидкості чи напрямку руху;
2. Компенсація рухів - завдяки вимірюванню прискорення, акселерометри дозволяють визначити, як рухається платформа, і компенсувати цей рух для

забезпечення стабільності. Це особливо важливо при веденні прицільної стрільби або використанні оптичних систем, які вимагають стійкої платформи.

3. Корекція траєкторії - акселерометри використовуються для корекції траєкторії пострілу або руху оптики. Вони допомагають врахувати впливи, такі як рух платформи або коливання, що може виникнути під час стрільби.

Також треба зазначити, що акселерометри часто інтегруються з іншими датчиками, такими як гіроскопи, для отримання комплексної інформації про рух платформи та орієнтацію в просторі.

### **1.7. Мета та завдання дослідження. Актуальність обраної теми**

Метою дослідження є пошук нових технічних методів та засобів реалізації автоматизованої системи забезпечення стабілізації, зокрема для легкої броньованої техніки.

До завдань які поставлені до цієї роботи відносяться такі:

- 1) опис сутності та використання систем стабілізації;
- 2) розгляд функцій які передбачені в системах стабілізації;
- 3) огляд методів та технічних засобів таких систем;
- 4) питання інтеграції та сумісності з обладнанням;
- 5) вибір оптимального чутливого елемента та архітектури;
- 6) дослідження можливостей та шлях вдосконалення.

Актуальність цієї теми полягає у тому, що пошук нових методів забезпечення високої точності стабілізації, зокрема для військового застосування, є дуже важливим. Проведене дослідження надасть можливість визначити перспективні чутливі елементи для застосування та шляхи вдосконалення.

## 1.8. Висновки до розділу 1

У цьому розділі було розглянуто сутність, функції, технічні рішення та ключові аспекти систем стабілізації озброєння. Системи стабілізації озброєння відіграють важливу роль у забезпеченні точності та ефективності прицільної стрільби, а також у забезпеченні стабільності роботи оптичних систем під час руху платформи.

Основні функції ССО включають стабілізацію платформи, корекцію траєкторії, автоматичне наведення, інтеграцію з іншими системами та захист від впливів навколишнього середовища. Для досягнення цих функцій використовуються різні технічні засоби, включаючи гіроскопи, акселерометри, барометри, електронні стабілізатори та інші прилади та чутливі елементи.

Також було розглянуто питання інтеграції та сумісності, які є важливими для успішного впровадження ССО. Інтеграція з іншими системами дозволяє створити комплексні рішення з підвищеною ефективністю та гнучкістю.

Розробка і вдосконалення ССО на основі нових технологій та інновацій є актуальним завданням, особливо в контексті військової техніки.

Дослідження та розвиток в цій області сприяють покращенню обороноздатності та точності систем стабілізації озброєння та їх застосуванню у різних галузях.

## РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ. ПРИНЦИП ДІЇ. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ ЄМНІСНИЙ МЕМС ЧЕ СТАБАЛІЗАТОРА

### 2.1. Різновиди чутливих елементів системи стабілізації. MEMS чутливі елементи

Для побудови систем стабілізації, зокрема для стабілізаторів озброєння, застосовуються різноманітні чутливі елементи, зокрема це гіроскопи, акселерометри, барометри, далекоміри, інерціальні навігаційні системи тощо. Ці чутливі елементи призначені для вимірювання рухів, прискорень та інших параметрів, які є важливими для забезпечення стабілізації. Точність стабілізації залежить від точності обраних чутливих елементів.

Один із різновидів чутливих елементів є МЕМС ЧЕ - це невеликі механічні та електронні системи, які поєднують у своїй будові мікроелектроніку та мікромеханіку, та використовуються для вимірювання різних параметрів, наприклад кутову швидкість, прискорення тощо.

МЕМС елементи мають наступні особливості:

- 1) маленькі габаритні розміри - передбачають можливість використання в будові компактних вимірювальних пристроїв;
- 2) низька споживана потужність - дозволяють реалізовувати системи з низьким енергоспоживанням;
- 3) здатні вимірювати параметри з такою точністю, яка буде оптимальною для низки систем, зокрема і для стабілізації;
- 4) невисока вартість;

Чутливі елементи можуть бути одноканальними, двоканальними та триканальними, відповідно:

- 1) одноканальні ЧЕ - здатні виконувати вимірювання параметра тільки в одному напрямку, наприклад рух по осі  $x$  або  $y$ . Для побудови систем стабілізації озброєння потрібно використовувати два аналогічних одноканальних ЧЕ, так як

гармата здатна рухатися по осям  $x$  та  $y$  і потрібно фіксувати рух одночасно у двох напрямках;

2) двоканальні ЧЕ - здатні вже виконувати вимірювання одночасно у двох площинах або координатах. Такий ЧЕ має можливість в формфакторі одного елемента зчитувати значення одночасно по осі  $x$  та  $y$ , що має певні переваги. У цій роботі буде розглядатися ємнісний МЕМС чутливий елемент;

3) трикоординатні ЧЕ - здійснюють вимірювання одночасно у трьох площинах, а саме  $x$ ,  $y$  та  $z$ . Такого роду чутливі елементи не мають можливості розкрити свій потенціал в даній задачі.

## **2.2. Різновиди акселерометрів та їх особливості**

На даний момент існує велика кількість різноманітних акселерометрів, наприклад: оптичні, струнні, ємнісні, п'єзоелектричні, гіроскопічні тощо.

У цій частині розглянемо декілька різновидів акселерометрів та їх особливості. Буде описано їх принцип роботи, переваги застосування, а також конструкційні особливості.

### **2.2.1. Оптичний акселерометр**

Оптичний акселерометр - це спеціалізований пристрій для вимірювання прискорення, який використовує оптичні методи. Цей тип акселерометра може забезпечити вимірювання з високою точністю та відповідає вимогам щодо надійності і стійкості.

Корпус акселерометра має форму циліндра з технологічним отвором діаметром 7мм, перпендикулярним до осі корпуса 1 (див. рис. 2.1). У корпус встановлюється центруюча металева прокладка 5, яка призначена для того, щоб чутливий елемент акселерометра знаходився точно в центрі корпуса. Центруюча прокладка має канави радіусом 0,10 мм, у які вкладаються циліндричні кварцові балки діаметром 0,2 мм. Потім балки притискаються елементом заземлення 6,

на поверхні якого також виготовлені такі самі канави. Далі елементи 5 та 6 прикручуються до корпусу 1 двома гвинтами 9. На іншому кінці кварцових балок 8 закріплена (приклеєна) інерційна маса 4, що має форму паралелепіпеда. Така конструкція чутливого елемента дозволяє переміщуватись інерційній масі лише по одній координаті – вздовж осі чутливості оптичного акселерометра [9].

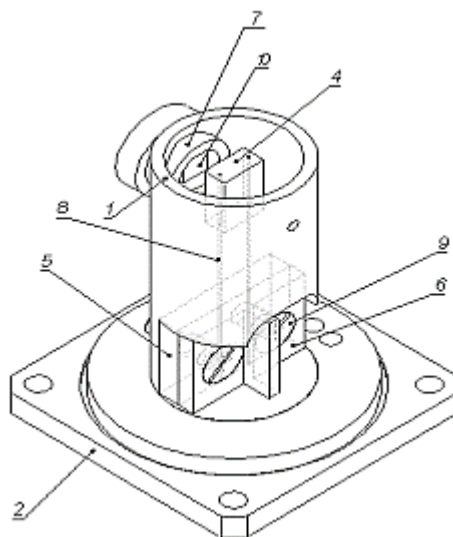


Рисунок 2.1. Конструкція оптичного акселерометра [9]

У корпусі є отвір, у якому розміщена муфта кріплення 7. В елементі 7 знаходиться оптичний опар 10. Її положення виставляється точно посередині інерційної маси. З протилежного боку в корпусі є отвір для мікрометричного гвинта. Корпус 1 за допомогою різьби вкручується в основу 2. В основі знаходяться три отвори для герметичних ввідів, котрі призначені для відкачки повітря і підключення до оптичного вихідного відлікового пристрою. Також в основі мають чотири отвори для закріплення акселерометра на пересувній системі. Далі вся конструкція закривається кришкою 3. В основі є кругла канавка, у яку входять краї кришки. Краї мають зовнішню та внутрішню фаски, що полегшує становлення кришки, яка міцно утримується в пазах основи [9].

До переваг такого типу акселерометра [9] відносять наступні:

1) достатньо висока точність виконання вимірювання. Дозволяє виконувати вимірювання з точністю до 0,0001%;

- 2) має високу стійкість до змін температури;
- 3) стійкий до перепаду тиску;
- 4) стійкість від впливу агресивних середовищ;
- 5) не піддається впливу електромагнітних перешкод.

### **2.2.2. Інтегруючий гіроскопічний акселерометр**

Найкращим прикладом інтегруючого вимірювального приладу є інтегруючий гіроскопічний акселерометр. Дослідження роботи ГІЛП як гірогравіметра засвідчують, що сумарна похибка приладу містить дві складові, які залежать від таких зовнішніх факторів, що не піддаються повному визначенню. Проте ці фактори виявляють свій вплив на параметри роботи вимірювальної системи ГІЛП [10].

Перша група факторів впливає на вібраційний кутовий рух внутрішнього підвісу - це вібраційні прискорення основи, амплітуда та фаза яких не піддаються точному визначенню [10].

Друга група факторів впливає на стабільність статичного коефіцієнта передачі приладу - ці фактори точно не відомі й можуть містити також першу групу факторів, а вплив на статичний коефіцієнт передачі здійснюється через зміну швидкості обертання ротора гіромотора [10].

Похибка від вібраційних збурень у випадку нормальних умов польоту становить 0,1 мГл, тобто приблизно 5 % від сумарної похибки ГІЛП, але вона може значно перевищити встановлене значення у випадку раптового підвищення амплітуди вібрацій, можливо, навіть короткочасного. Похибка від зміни швидкості обертання ротора гіромотора оцінена такими ж значеннями. Встановлено прямо пропорційну залежність між значеннями зазначених похибок та величиною факторів збурень. Наприклад, якщо амплітуда вібрацій підвищиться у два рази, то похибка також підвищиться у два рази [10].

Розглянемо будову гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень, схему якого показано на рис. 2.2.

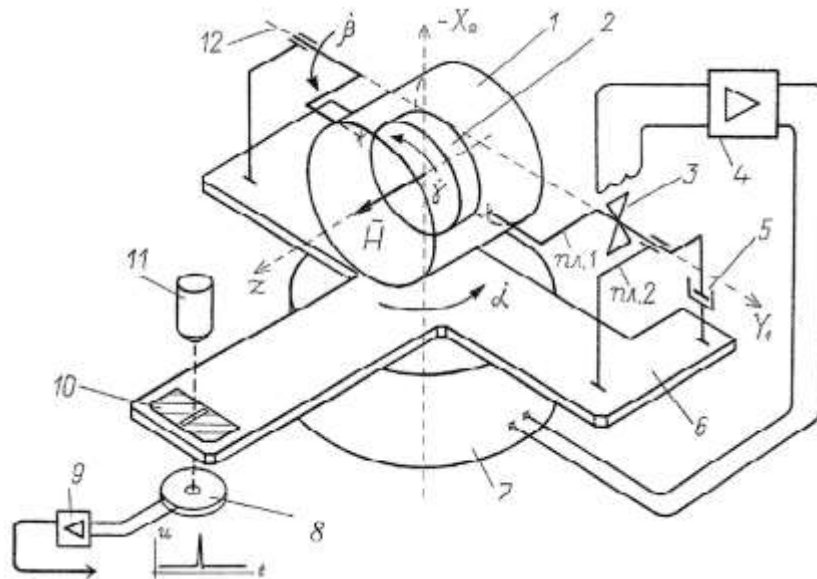


Рисунок 2.2. Гіроскопічний інтегратор лінійних прискорень [10]

Узагальнена схема приладу наведена на рис. 4: 1 - гіромотор; 2 - ротор гіромотора; 3 - датчик кута повороту внутрішнього підвісу (мікросин); 4 - демодулятор-підсилювач вихідного сигналу датчика кута повороту; 5 - рідинний демпфер; 6 - поворотна платформа; 7 - двигун-привід поворотної платформи; 8 - оптичний датчик положення поворотної платформи; 9 - перетворювач-підсилювач сигналу датчика положення поворотної платформи; 10 - мембрана зі щілиною, закріплена на поворотній платформі; 11 - джерело зосередженого світла; 12 - вісь внутрішнього підвісу гіромотора [10].

### 2.2.3. Мікроакселерометр ємнісного типу

Ключовими елементами будь-якої мікросистеми є актюатор, мікродавач і МП-пристрій. Давач, що становить собою інтегральний пристрій, призначений для фіксації стану чи зміни стану навколишнього середовища, в якому він розміщений. Актюатор перетворює електричну енергію у керований рух, а



мікропроцесорний пристрій обробляє, зберігає та передає інформацію від датчика. Мікродатчики виконують різноманітні функції в технічних об'єктах залежно від їхнього призначення. Розрізняють датчики (детектори) руху, термічні датчики, датчики тиску, сенсори для вимірювання напруження матеріалу, переміщення об'єктів, їх швидкості та прискорення. Найпоширенішими є датчики для вимірювання прискорення об'єктів, або акселерометри [11].

Основним принципом дії ємнісного акселерометра, як було вказано вище, є зміна ємності конденсатора, утвореного конструкцією пристрою та його рухомою частиною. Конструкція акселерометра містить дві або більше пластин, одні з яких є нерухомо закріплені, інші залишаються частково рухомими. При прикладенні навантаження типу прискорення переміщуються рухомі частини пристрою, що, відповідно, викликає зміну ємності конденсатора. Основними двома видами конструкції мікроакселерометра є: (рис. 2.3, а) конструкція, де рухома сейсмічна маса виконує функцію рухомої пластини конденсатора; (рис. 2.3, б) конструкція, де функцію пластин конденсатора виконують балки, прикріплені до сейсмічної маси [11].

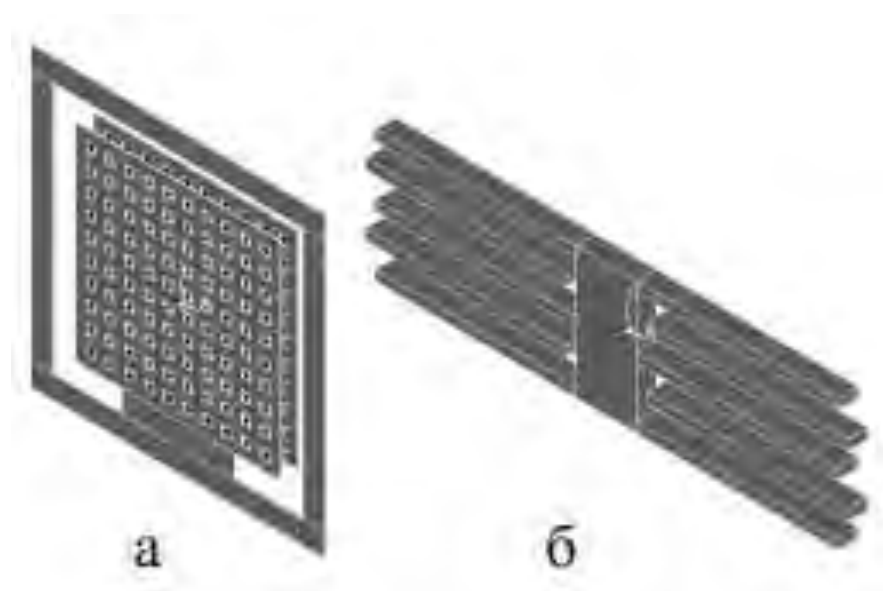


Рисунок 2.3. Типи конструкції акселерометра [11]

Схематичні зображення обох конструкцій показані на рис. 2.4, а геометричні розміри балок – на рис. 2.3 [11].

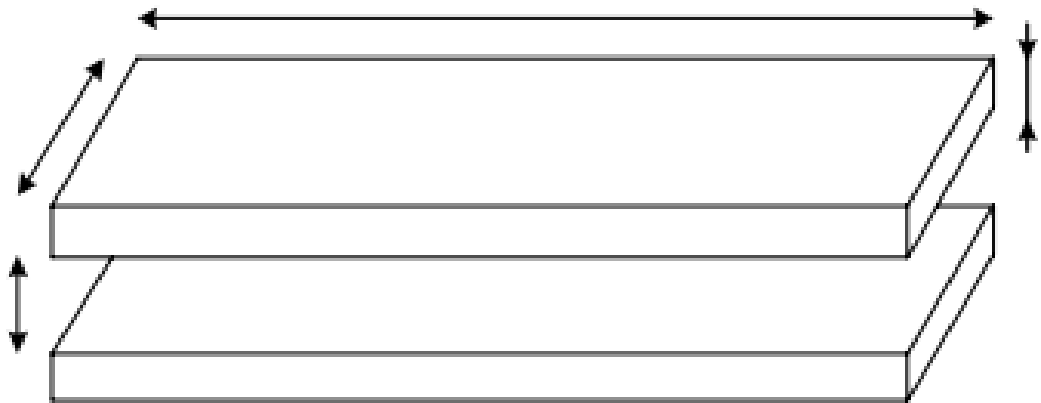


Рисунок 2.4. Геометричні розміри балок [11]

Залежність ємності між кожними двома балками від прискорення визначатиме чутливість пристрою. Проте основною складністю цієї структури є те, що при зміщенні балки прогинаються більше чи менше залежно від прикладеного навантаження, що спричиняє нелінійність залежності ємності від прикладеного прискорення [11].

### **2.3. Двоканальний ємнісний MEMS чутливий елемент. Принцип роботи та конструкція**

Двоканальний ЧЕ - це вимірювальний пристрій, який містить у своїй конструкції два окремих канали, здатний вловлювати зміни фізичного параметру або величини з двох різних джерел, площин або напрямків, виконуючи це вимірювання одночасно. Ця особливість робить двоканальні вимірювальні перетворювачі досить корисними та важливими у системах стабілізації, зокрема озброєння, та інших.

Системи стабілізації також будують на основі мікроелектромеханічних системах [8, 16, 17], тобто MEMS чутливих елементів.

Система стабілізації стабілізатора озброєння легких броньованих машин (ЛБМ) призначена для того, щоб забезпечувати збіг вимірювальної осі ємнісного чутливого елементу (ЄЧЕ) із довідковою вертикаллю. Для цього ЄЧЕ встановлюється на горизонтальній стабілізованій платформі, яка має у своєму складі два лінійні акселерометри та виконавчі механізми у вигляді спеціальних двигунів [3].

На рис. 2.5 нижче показано схему одноканального ємнісного чутливого елементу.

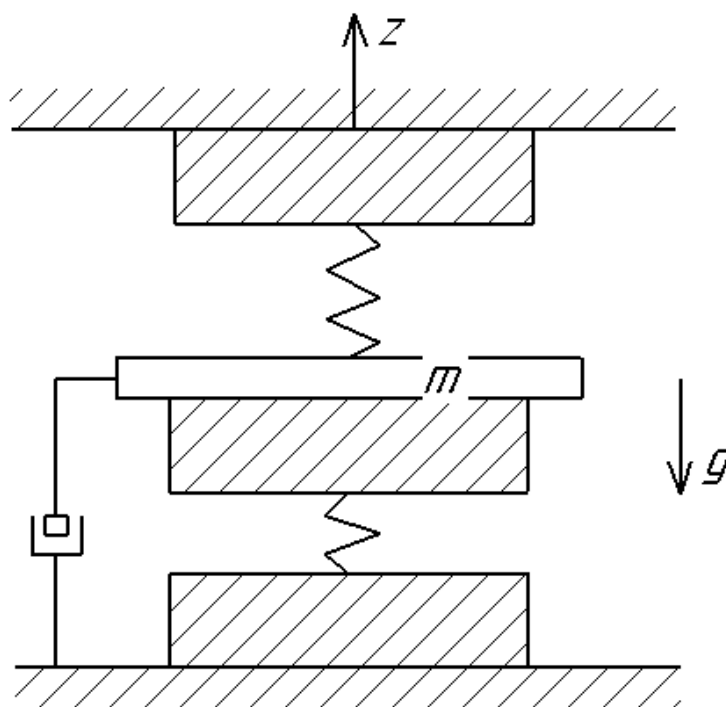


Рисунок 2.5. Схема одноканального ЄЧЕ

Принцип роботи такого чутливого елементу ґрунтується на зміні зазору між пластинами в результаті дії певної фізичної величини. Відповідно на виході даного чутливого елементу отримується вихідна напруга.

Розглянемо будову та конструкцію типового ємнісного МЕМС акселерометра.

Найактуальнішою та найбільш практичною вважається конструкція, що складається з нерухомої основи (1), часто з'єднаної з корпусом, та рамки (2) з чутливим елементом (3), прикріпленої до верхньої рухомої обкладинки (4). На

обох пластинах напилено шар діелектрику (5). Обкладки являють собою електроди, які є провідниками певної форми та знаходяться у робочому середовищі. Для обкладок не слід використовувати матеріали з високою рухливістю атомів, такі, як мідь або золото. Атоми цих металів, проникаючи в діелектрик, можуть утворювати провідні перемички між обкладками. Матеріал обкладки повинен мати гарну адгезію до матеріалу підкладки і до діелектрика (див. рис.2.6) [6].

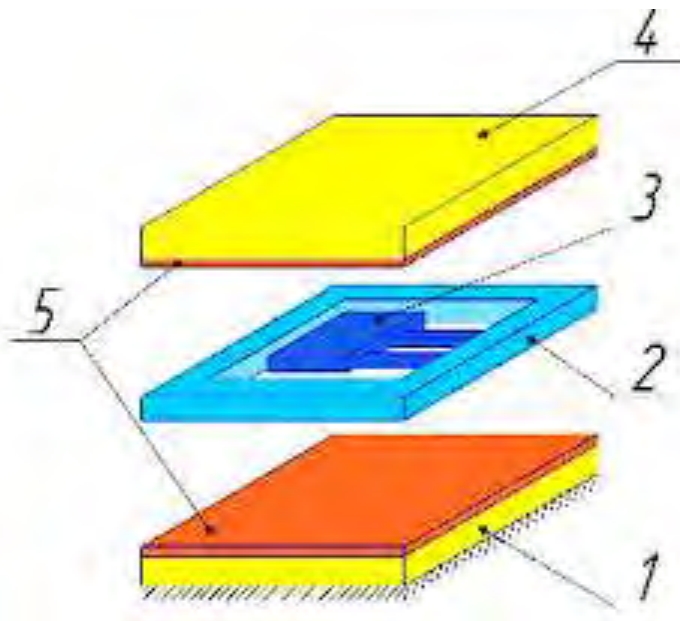


Рисунок 2.6. Типова конструкція ємнісного МЕМС акселерометра [6]

Розглядаючи питання оптимізації конструкції і зменшення масо-габаритних характеристик, доцільно прагнути до скорочення величини інерційної маси, одночасно досягаючи при цьому збільшення значень частот власних коливань чутливого елемента. Доцільним рішенням є виключення інерційної маси і використання тільки розподіленої маси консолі [6].

Диференціальна структура дозволяє збільшити амплітуду і поліпшити лінійність сигналу (див. рис. 2.7) [6].

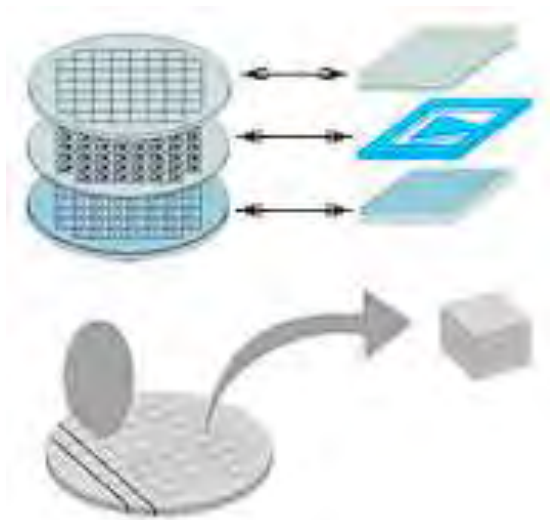


Рисунок 2.7. Розміщення ємнісних MEMC перетворювачів з оптимізованим чутливим елементом на одній пластині [6]

Для забезпечення принципу двоканальності, симетрично одній MEMC - пластині, встановлено ідентичну їй другу MEMC - пластину, сигнали яких сумуються в суматорі й передаються на подальшу обробку та підсилення [6].

Симетрія ЧЕ зменшує залежність від температури і чутливості по осі і покращує лінійність. На ємнісні елементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння  $g$ , вертикальне прискорення  $h$  літака та інструментальні похибки  $\Delta i$  від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових пластин та мас, від впливу змін температури, вологості та тиску зовнішнього середовища, крайових ефектів [6].

Варто виділити основні переваги ємнісних чутливих елементів:

- малі габаритні розміри;
- мала вага;
- висока стійкість та чутливість;
- лінійність вимірювання;

Відповідно маємо наступні недоліки таких ЧЕ:

- мала потужність вихідного сигналу (варто використовувати певні підсилювачі вихідного сигналу);
- наявність шумів, які впливають на показання;
- точність не достатня для усіх потреб;
- наявність похибок.

## 2.4. Ємнісний триосьовий MEMS акселерометр з цифровим виходом

Ємнісний триосьовий MEMS акселерометр з цифровим виходом (див. рис. 2.8) представляє собою пристрій, який вимірює прискорення у трьох взаємно перпендикулярних напрямках і видає у вигляді вихідного значення цифровий сигнал, що представляє величину цього прискорення по всім трьом напрямках.

Використання такого акселерометра дозволяє визначати зміни швидкості та рух об'єкта, на якому він встановлений.

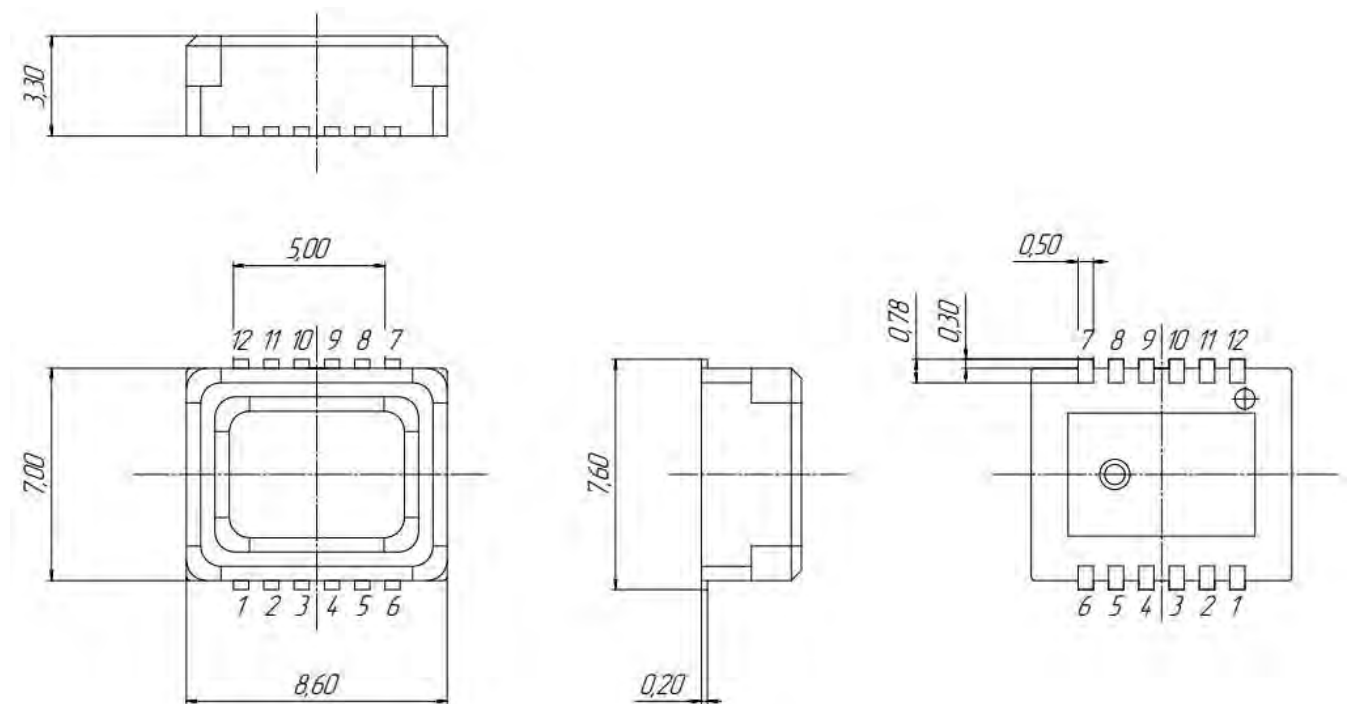


Рисунок 2.8. Триосьовий ємнісний акселерометр

У даному акселерометрів встановлено високоточний ємнісний ЧЕ для визначення значення прискорення у трьох осях, електроніка ASIC з цифровим виходом з використанням інтерфейсу SPI.

Основними характеристиками такого ЧЕ є такі:

1) забезпечення вимірювання у трьох осях - здатність вимірювати прискорення вздовж трьох взаємо перпендикулярних напрямків, відповідно за віссю x, y та z;

2) цифровий вихід - використовується цифровий вихід SPI, що у свою чергу полегшує інтеграцію з цифровими системами та мікроконтролерами;

3) висока чутливість - ЧЕ здатний забезпечити достатньо високу чутливість для вимірювання малих значень;

4) низька споживана потужність - для роботи потребує незначного використання електроенергії, що робить можливим використання у системах з обмеженими енергоресурсами;

5) широкий діапазон вимірювання - зазвичай даний ЧЕ дозволяє забезпечити широкий діапазон вимірювання, що робить можливим застосування даного чутливого елемента для різних цілей і в різних сферах;

6) малі габаритні розміри та мала вага - дозволяє легко впроваджувати в різні пристрої та системи так як не потребує багато місця та маю малу вагу.

Варто сказати, що такий акселерометр може бути використаний для різних сфер та у різних областях, зокрема в авіаційній техніці, автомобільній, медичних приладах, а також у системах стабілізації, зокрема і для озброєння.

## **2.5. Висновки до розділу 2**

Розглянута конструкції ємнісного MEMS чутливого елемента дозволяє вимірювати параметри шляхом визначення зміни ємності між обкладинками внаслідок руху рухомої частини. Відповідно якщо на вимірювальний пристрій буде впливати певна фізична величина, наприклад прискорення, рухома частина буде зміщуватися і у результаті цього зміщення зміниться ємність між

обкладинками ЧЕ. Це значення можна вимірювати і відповідно це значення відобразить прискорення.

Використана диференціальна структура, яка використовується для такого роду ЄЧЕ дозволяє використовувати два ідентичних чутливих елементи, що допомагає зменшити вплив змін температури і покращити лінійність вимірювань, що в свою чергу підвищує точність та стійкість системи.

Ця конструкція дозволяє створювати надійні ємнісні МЕМС ЧЕ, які матимуть застосування в різних областях де є потреба забезпечити стійкість та точність вимірювання, зокрема і для систем стабілізації озброєння.



## РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРИНЦИПУ РОБОТИ ЄМНІСНОГО МЕМС ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ

### 3.1. Система стабілізації з ємнісним чутливим елементом

Варто виконати детальний розгляд принципу [3, 11, 13, 18] та математичний опис роботи системи стабілізації на базі ємнісного чутливого елемента.

Система стабілізації працює наступним чином. Вихідні сигнали лінійних акселерометрів  $f_y$ ,  $f_x$ , установлених на гіростабілізованій платформі (ГСП), орієнтованій у географічній системі координат, осі чутливості яких спрямовані на північ та на схід відповідно, матимуть наступний вигляд [3]:

$$f_x = -(2r\dot{\varphi}_c + r\ddot{\varphi}_c)\cos X + (r\ddot{\lambda} - r\dot{\varphi}_c^2)\sin X - 2r\omega_3\lambda\dot{\varphi}_c\sin\varphi - r\lambda\dot{\varphi}_c\cos\varphi + \theta g; \quad (3.1)$$

$$f_y = 2r\dot{\varphi}_c\omega_3\sin\varphi_c + 2r\varphi_c\lambda\dot{\varphi}_c - 2r\lambda\dot{\varphi}_c\cos\varphi_c - r\lambda\ddot{\varphi}_c\cos\varphi_c - 2r\omega_3\cos\varphi_c - v g; \quad (3.2)$$

де  $\theta$ ,  $v$  - кути між нормальми до еліпсоїда і геоїда відповідно у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана;

$\varphi$ ,  $\varphi_c$  - географічна та геоцентрична широта;

$X$  - відхилення від вертикалі;  $\lambda$  - довгота місця.

Отримані сигнали надходять до бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ), де формується керуючий сигнал та надходить до двигунів, які, у свою чергу, вирівнюють ГСП у нульове положення. Якщо ГСП виставлена абсолютно точно у положення вертикалі, то горизонтальні компоненти прискорення сили тяжіння дорівнюють нулю [3].

Сигнал  $\dot{\varphi}$  буде використовуватися для керування ГСП відносно осі  $x$ , спрямованої на північ, а сигнал  $\lambda\dot{\varphi}\cos\varphi$  - для керування відносно осі  $y$ , спрямованої на схід. Якщо сигнали швидкості зміни широти і довготи ще раз

проінтегрувати, а потім підсумкові значення широти і довготи ввести в БЦОМ для обчислення прискорень, що компенсуються за сигналами акселерометрів, то дістанемо систему інерціальної навігації ЛБМ [3].

На рис. 3.1. продемонстровано блок-схему системи стабілізації з ємнісним чутливим елементом.

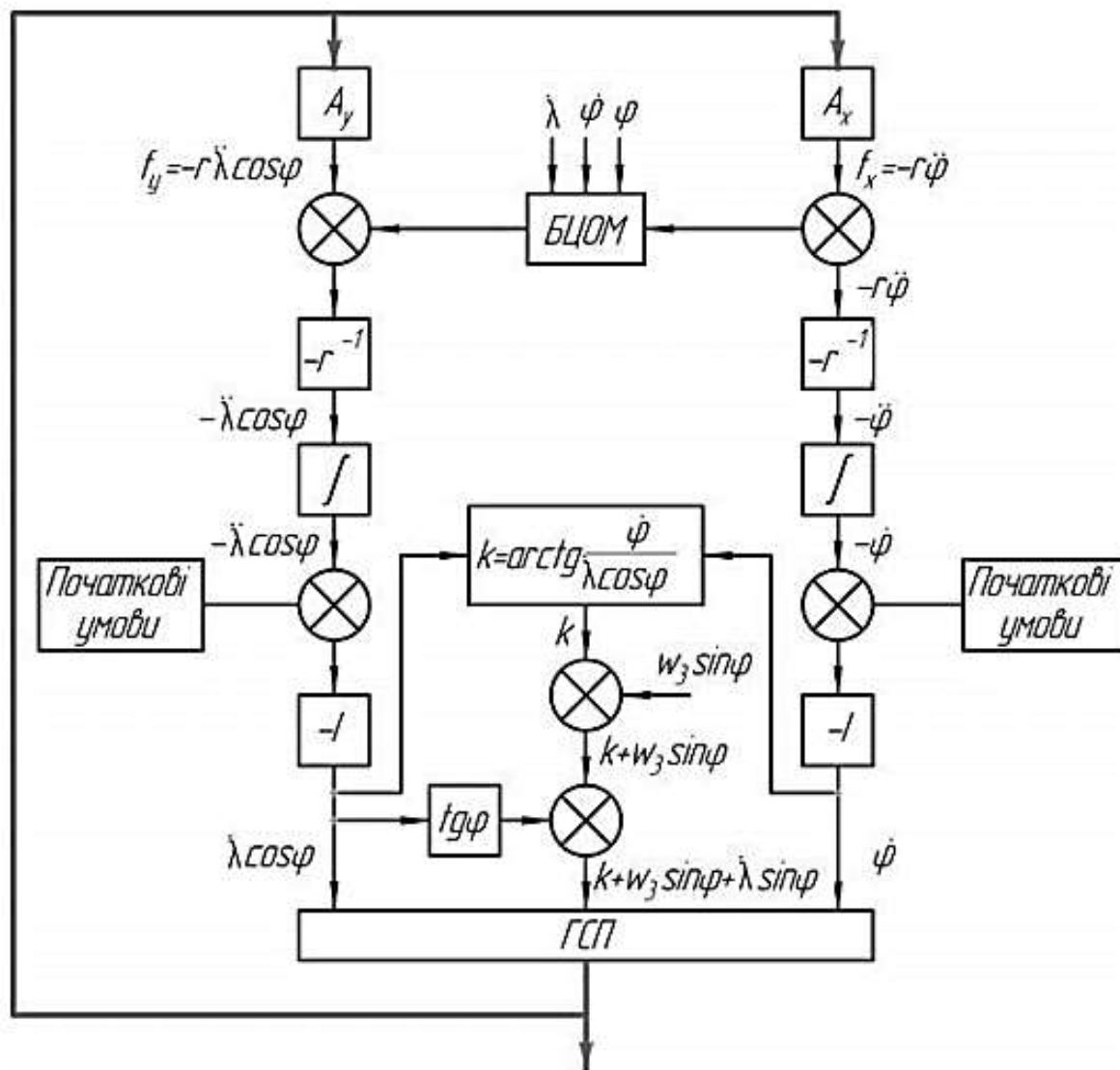


Рисунок 3.1. Блок-схема системи стабілізації з ЄЧЕ [3]

Сигнал буде використовуватися для керування ГСП відносно осі  $x$ , спрямованої на північ, а сигнал  $\cos$  - для керування відносно осі  $y$ , спрямованої на схід. Якщо сигнали швидкості зміни широти і довготи ще раз проінтегрувати, а потім підсумкові значення широти і довготи ввести в БЦОМ для обчислення

прискорень, що компенсуються за сигналами акселерометрів, то дістанемо систему інерціальної навігації ЛБМ [12].

Відповідно [3] ці отримані сигнали надходять до блоку керування, де саме і формуються сигнали щодо керування двигунами і вони встановлюють ГСП у нульове положення. При умові, якщо ГСП встановлена рівно у вертикальному положенні, то горизонтальні складові рівню нулю. Враховуючи це [3] блок керування буде здатним компенсувати:

$$f_x \Rightarrow 0 = 2r\omega_3 \dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi - r\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi; \quad (3.3)$$

$$f_y \Rightarrow 0 = 2r\dot{\varphi}_3 \omega_3 \sin \varphi_c + 2r\varphi_c \dot{\lambda} \sin \varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \varphi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \varphi_c \quad (3.4)$$

Відповідно знехтуючи складовими другого порядку та прийнявши відхилення від вертикалі рівним нулю [3], маємо наступне:

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c; \quad (3.5)$$

$$f_y = -2r\ddot{\lambda} \cos \varphi_c \quad (3.6)$$

На виході системи [3] маємо наступні вихідні сигнали:

1.  $\dot{\varphi}$  - сигнал для забезпечення керування гіростабілізованою платформою відносно осі  $x$ ;
2.  $\dot{\lambda} \cos \varphi$  - сигнал для забезпечення керування гіростабілізованою платформою відносно осі  $y$ .

### 3.2. Опис математичної моделі акселерометра ємнісного типу

У цій частині розділу детально буде розглянуто та описано особливості роботи акселерометра ємнісного типу.

Класичні формули визначення ємності між плоскими пластинами виявляються тут недієвими. Крім цього, потрібно врахувати, що модель акселерометра є об'ємним тілом, у якому ємності виникають не тільки між взаємно паралельними гранями балок, а взагалі між будь-якими двома гранями. Для адекватного розрахунку ємності необхідно розрахувати розподіл

електричного потенціалу в середовищі, в якому знаходиться акселерометр (див. рис. 3.1) [11].

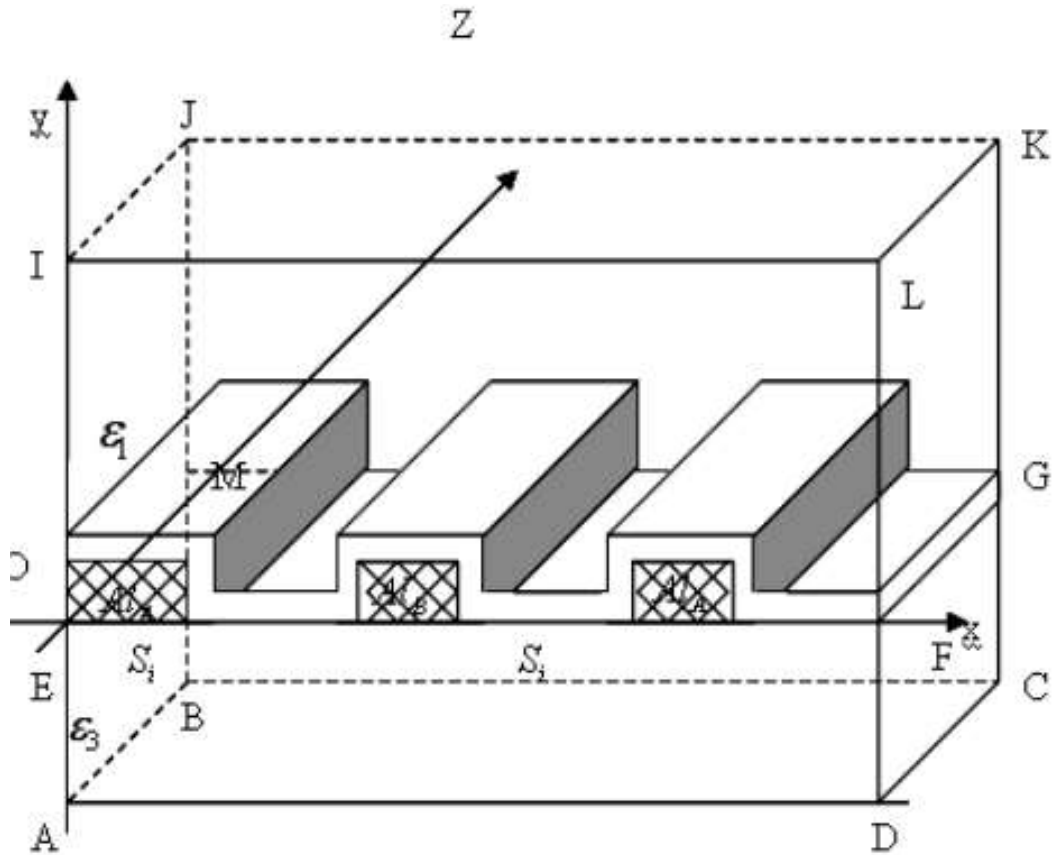


Рисунок 3.2. Тривимірний об'єкт моделювання [11]

Розглянемо описання математичної моделі [11] ємнісного акселерометра, яка враховує визначення розподілу потенціалів у тривимірному випадку для однорідного середовища:

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} = 0; \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} = 0; \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z^2} = 0 \quad (3.9)$$

де  $\varphi_{1,2,3}$  - величини електростатичного середовища;

$x, y, z$  - просторові координати;

при  $\varphi_{1,2,3} \in$  середовищу з діелектричною проникністю  $\varepsilon_{1,2,3}$ .

До отриманої системи диференціальних рівнянь (3.7 - 3.9) є необхідним врахувати крайні умови [11]. Відповідно маємо наступне:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial n} = 0 \quad (3.10)$$

при  $n \in S$ ,  $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_0$ ;

при  $\varphi_{2,3} \in AI_A$ ,  $\varphi_2 = \varphi_3 = -\varphi_0$ ;

при  $\varphi_{2,3} \in AI_B$  маємо:

$$\varepsilon_1 \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \right) \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = \varepsilon_2 \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right) \varepsilon_1 / \varepsilon_2, \varepsilon_2 \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right) = \varepsilon_3 \left( \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} \right); \quad (3.11)$$

$$\varphi_{1\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \varphi_{2\varepsilon_1/\varepsilon_2}, \varphi_{2\varepsilon_2/\varepsilon_3} = \varphi_{3\varepsilon_2/\varepsilon_3}, \quad (3.12)$$

де  $n$  - нормаль до бічної поверхні області моделювання;

$\varepsilon_{1,2,3}$  - діелектрична проникність середовища;

$t$  - нормаль до границі розділу двох середовищ.

Для визначення розподілу напруженості електричного поля у випадку тривимірної області необхідно розв'язати рівняння [11]. Відповідно маємо наступне:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -E; \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} = -E; \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = -E \quad (3.15)$$

Запишемо розподіл вектору електричної індукції [11]. Дані значення визначають за наступним виразом:

$$D_{1,2,3} = \varepsilon_{1,2,3} E \quad (3.16)$$

На границі розподілу двох середовищ також варто врахувати крайні умови [11], які відображені наступним виразом:

$$D_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \right) E_{\varepsilon_1/\varepsilon_2}, D_{\varepsilon_2/\varepsilon_3} = \left( \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} \right) E_{\varepsilon_2/\varepsilon_3} \quad (3.17)$$

де  $E_{\epsilon_2/\epsilon_3}$ ,  $E_{\epsilon_1/\epsilon_2}$  - значення напруженості електричного поля на границі розділення середовищ;

$D_{\epsilon_2/\epsilon_3}$ ,  $D_{\epsilon_1/\epsilon_2}$  - значення вектору електричної індукції на границі розділення середовища.

### 3.3. Опис конструктивних різновидів ємнісного перетворювача

Ємнісний перетворювач є одним із перспективних та досконалих перетворювачів на даний момент. Його можна використовувати для різного роду вимірювань, зокрема широке поширення вони отримали для побудови автоматизованих систем керування або вимірювання. Зустрічається використання ємнісних чутливих елементів у системах автоматизованої стабілізації, системах керування літальними апаратами [12], та інших системах які містять акселерометри, гравіметри та інші вимірювальні елементи.

Для визначення переваг та особливостей використання систем на основі чутливого елемента з ємнісним перетворювачем варто розглянути його конструктивні особливості.

Ємність будь-якого перетворювача залежить від трьох основних параметрів: площі  $S$ , відстані  $\delta$  між пластинами і діелектричної проникності середовища  $\epsilon$  між пластинами перетворювача [13]:

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (3.18)$$

Зі зміною значення однієї з величин формули 3.18 змінюється і значення ємності  $C$ .

Прологарифмуємо вираз для  $C$  [13]. В результаті отримаємо наступний вираз:

$$\ln C = \ln \epsilon + \ln S - \ln \delta \quad (3.19)$$

Продиференціювавши отриманий вираз матимемо наступне:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{\Delta \delta}{\delta_0} \quad (3.20)$$

Відповідно, якщо:

$$S = const;$$

$$\varepsilon = const;$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

Маємо варіант конструкції ємнісного перетворювача із змінним зазором, або із змінною відстанню між пластинами [13]. Відповідно:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 \pm \Delta} \quad (3.21)$$

На рис. 3.2 зображено конструкцію (а) ємнісного перетворювача зі змінним зазором та його характеристику (б).

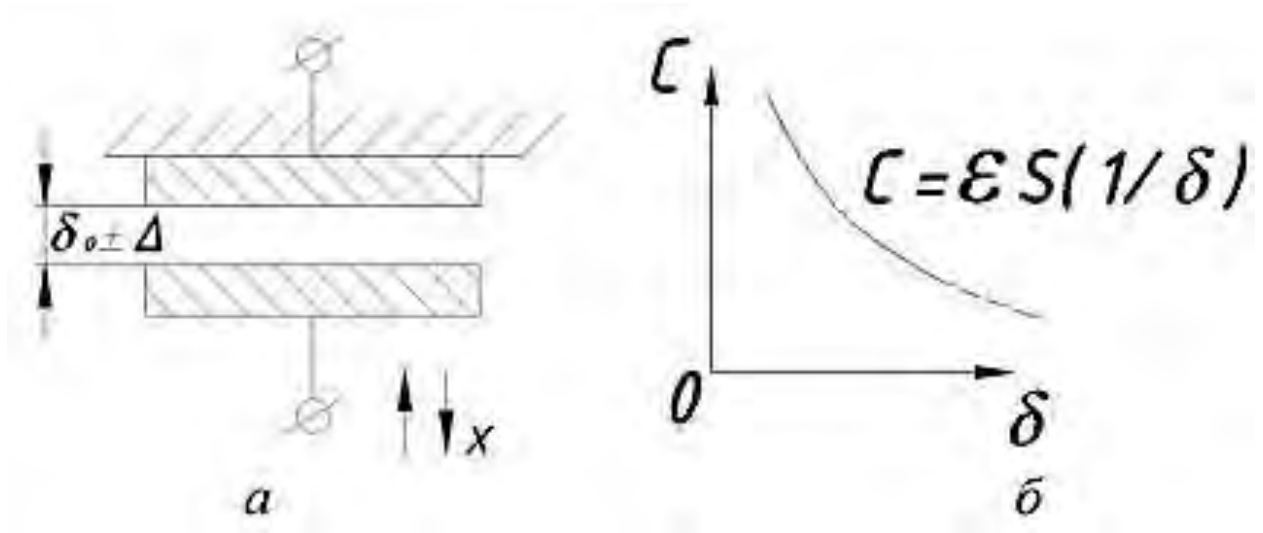


Рисунок 3.2. Ємнісний перетворювач із змінним зазором: а - конструкція; б - характеристика [13]

Характеристика ємнісного перетворювача зі змінним зазором становить  $C = f(\delta)$  при сталих значеннях  $\varepsilon$  та  $S$  змінюється за гіперболічним законом [13], що і відображено на рис. 3.2, б.

Відповідно, якщо:

$$\varepsilon = \text{const};$$

$$\delta = \text{const};$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta S}{S_0}$$

Матимемо варіант конструкції ємнісного перетворювача із змінною площею взаємного перекриття пластин [13]:

$$C = \frac{\varepsilon(S \pm \Delta)}{\delta} \quad (3.22)$$

На рис. 3.3 зображено конструкцію (а) ємнісного перетворювача із змінною площею взаємного перекриття пластин та його характеристику (б).

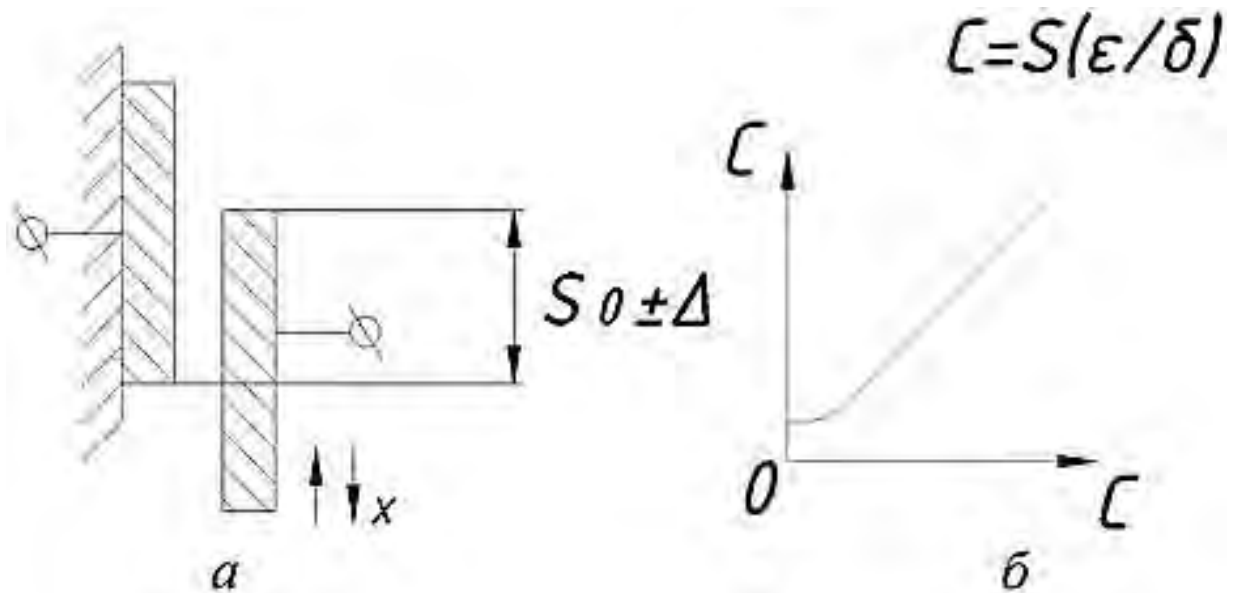


Рисунок 3.3. Ємнісний перетворювач із змінною площею: а - конструкція; б - характеристика [13]

Його характеристика визначається, як  $C = f(S)$  та змінюється майже лінійно [13], що і відображено на рис. 3.3, б.



Відповідно, якщо:

$$S = \text{const};$$

$$\delta = \text{const};$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Матимемо варіант конструкції ємнісного перетворювача із змінною діелектричною проникністю [13]:

$$C = \frac{(\varepsilon_0 \pm \Delta \varepsilon)S}{\delta} \quad (3.23)$$

Варто зазначити, що такий тип ємнісного перетворювача має найменше застосування серед інших.

На рис. 3.4 зображено конструкцію (а) ємнісного перетворювача із змінною діелектричною проникністю та його характеристику (б).

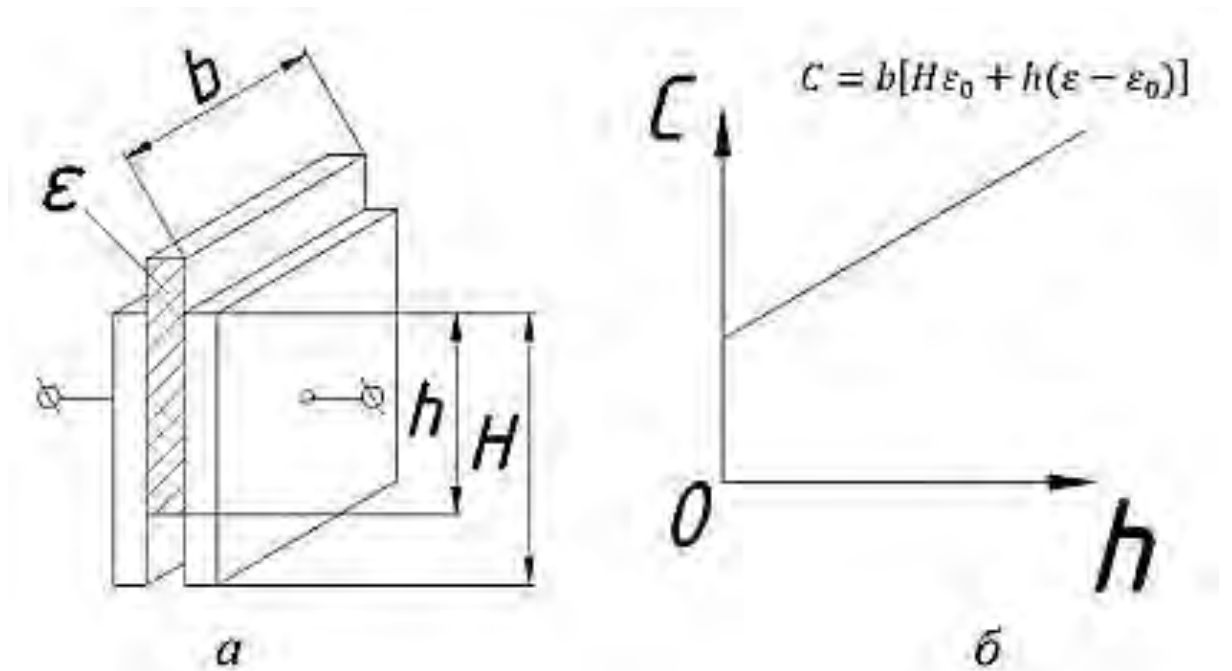


Рисунок 3.4. Ємнісний перетворювач із змінною діелектричною проникністю: а - конструкція; б - характеристика [13]

Характеристика ємнісного перетворювача із змінною діелектричною проникністю становить  $C = f(\varepsilon)$  при сталих значеннях  $\delta$  і  $S$  змінюється лінійно [13], що і відображено на рис. 3.4, б.

### **3.4. Потужність вихідного сигналу та чутливість ємнісного перетворювача**

Потужність вихідного сигналу та чутливість є важливими характеристиками чутливого елемента, зокрема ємнісного перетворювача.

Чутливість є базовою характеристикою ЧЕ, яка дозволяє безпосередньо вимірювати параметри. Завдяки чутливості відбувається реакція на вплив і відповідно за цим слідує вимірювання зміни ємності і розрахунок значення параметра. Мінімальне значення чутливості впливає на точність.

Потужність вихідного сигналу також є важливою характеристикою, так як вона впливає на ефективність передачі інформації від джерела до приймача, у даному випадку від ЧЕ до приймача, який може бути представлений у вигляді обчислювального пристрою, БЦОМ, мікроконтролера тощо.

Чим більша вихідна потужність сигналу, тим менше він піддається впливу перешкод та завад, які можуть виникати. Також потужність впливає на якість прийому сигналу.

Враховуючи дані фактори існує необхідність збільшення чутливості ЧЕ та збільшення потужності вихідного сигналу, задля покращення функціональних можливостей системи.

Щоб збільшити чутливість ЄП, застосовують диференціальні конструкції із рухомою середньою пластиною і змінним зазором (див. рис. 3.5) [13].

Під час переміщення середньої пластини ємність однієї половини такого перетворювача зростає, а другої половини - зменшується, тобто чутливість такого диференціального ЄП порівняно з простим перетворювачем зростає [13].

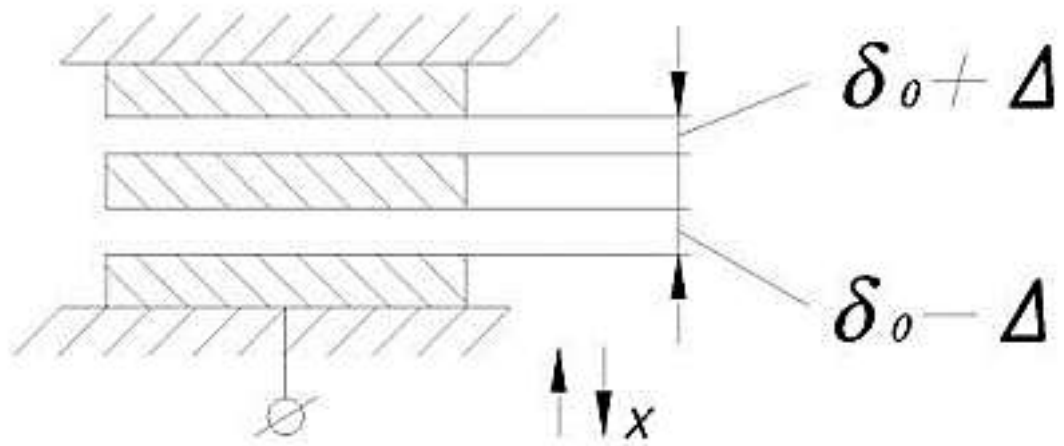


Рисунок 3.5. Диференціальний ємнісний перетворювач із змінним зазором [13]

Відповідно маємо для даного типу ємнісного перетворювача значення ємності кожної з його половин:

$$C_{12} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 + \Delta}; \quad (3.24)$$

$$C_{13} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 - \Delta}; \quad (3.25)$$

Розглянемо особливості конструкції ємнісного перетворювача, що дозволить збільшити потужність вихідного сигналу.

Для того, щоб збільшити потужність вихідного сигналу, відстань між пластинами потрібно вибрати мінімальною. Проте при цьому зменшується і можливе переміщення рухомої пластини [13].

На рис. 3.6 зображено диференціальний ЄП зі змінною площею взаємного перекриття пластин. [13].

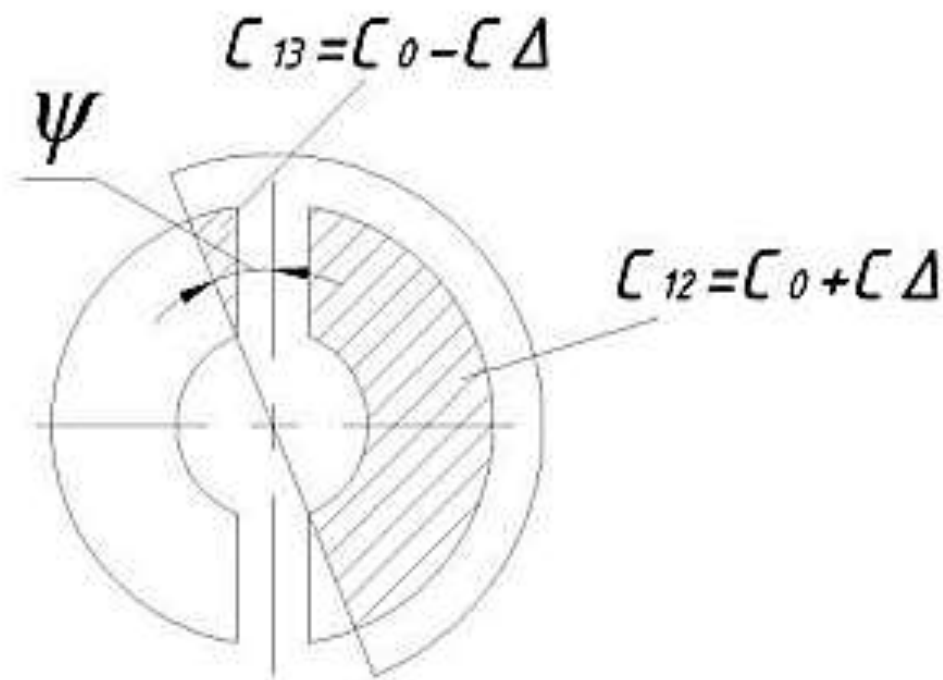


Рисунок 3.6. Диференціальний ємнісний перетворювач із змінною площею [13]

Відповідно ємність кожної з половин диференціального ємнісного перетворювача із змінною площею буде визначатися за наступними виразами:

$$C_{12} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0} \left( \frac{1}{2} + \frac{\psi}{\pi} \right); \quad (3.26)$$

$$C_{13} = \frac{\varepsilon S}{\delta_0} \left( \frac{1}{2} - \frac{\psi}{\pi} \right), \quad (3.27)$$

де  $\psi$  - кут повороту середньої пластини, що переміщується в межах  $\pm\pi/2$ .

### 3.5. Висновки до розділу 3

Ємнісні перетворювачі є дуже корисними, досить надійними, поширеними та перевіреними чутливими елементами, які можна використовувати у різних цільових призначеннях, зокрема як складовий чутливого елемента акселерометра для системи стабілізації.

Існує велика кількість різновидів ємнісних перетворювачів, доречність використання яких обумовлюється ситуативною необхідністю та особливостями системи для якої вони будуть використані. Однак найпоширеніші можна виділити: ємнісний перетворювач із змінним зазором; ємнісний перетворювач із змінною площею; ємнісний перетворювач із змінною діелектричною проникністю середовища. Останній, як було визначено, є менш поширений серед усіх розглянутих інших типів. Для кожного з розглянутих типів ємнісного перетворювача існують окремі вирази, для розрахунку їх ємності, що варто враховувати при проектуванні.

Кожен з ємнісних перетворювачів відповідно має свої особливості, призначення, переваги та недоліки. Але варто зазначити, що для досягнення більшої точності вимірювання використовуються двоканальні ємнісні перетворювачі, що здатні компенсувати зовнішні впливи, або розглянуті диференціальні.

Важливим питанням залишається покращення чутливості ємнісного перетворювача, задля збільшення його вимірювальних характеристик. А також посилення вихідного сигналу, що суттєво може впливати на точність значень кінцевого результату.

## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРА

### 4.1. Теоретичні аспекти дослідження двоканального ємнісного МЕМС акселерометра

Дослідження двоканального ємнісного акселерометра може бути виконане за допомогою ряду кроків, що включають такі аспекти як, теоретичний аналіз, огляд експериментальної бази, проведення аналізу, дослідження впливу зовнішніх чинників, точність вимірювання та інші.

Перелік можна надати у вигляді наступного плану дослідження:

- 1) теоретична база:
  - розгляд теорії роботи двоканального ємнісного МЕМС акселерометра;
  - вивчення та дослідження принципів вимірювання прискорення та взаємодії з іншими складовими системи стабілізації;
- 2) конструкційні особливості;
  - дослідження будови та особливостей двоканального ємнісного МЕМС акселерометра. Визначення переваг застосування двох каналів;
  - визначення характеристик використаних матеріалів ЧЕ;
- 3) питання калібрування:
  - визначення методів калібрування та корекції значень;
- 4) вимірювання параметрів для дослідження:
  - проведення експериментів для вимірювання динамічних властивостей акселерометра при різних умовах та середовищах;
  - аналіз отриманих результатів вимірювання, визначення особливостей роботи при різних умовах;
- 5) визначення шляхів оптимізації та покращення:
  - на основі отриманих даних визначити чи є необхідність доопрацювання певних моментів роботи системи, та необхідність оптимізації;
  - визначення можливостей для подальшого вдосконалення;

Цей список представляє та описує узагальнений процес щодо проведення експериментальних досліджень ЧЕ.

#### 4.2. Опис досліджуваної установки

Для дослідження ємнісного чутливого елемента використовується спеціальна досліджувана установка (див. рис. 4.1.), яка призначена для здійснення фізичного впливу на об'єкт дослідження з подальшою фіксацією отриманих даних.

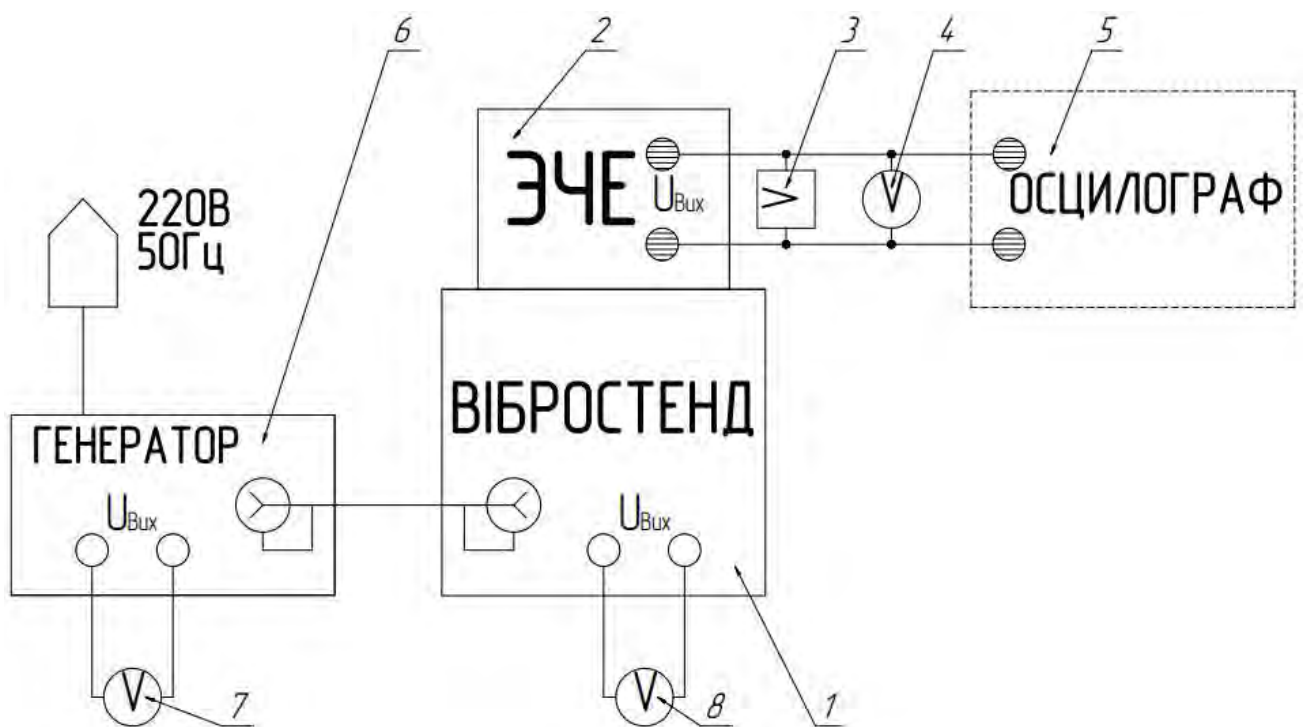


Рисунок 4.1. Принципова схема установки для проведення експериментальних досліджень:

- 1 - генератор механічних коливань ГМК-1 (вібростенд);
- 2 - досліджуваний ємнісний чутливий перетворювач;
- 3 - підсилювач вихідного сигналу;
- 4 - вольтметр;
- 5 - осцилограф;
- 6 - генератор змінної напруги живлення;

7 - вольтметр для реєстрації напруги на генераторі;

8 - вольтметр для реєстрації напруги на вібростенді.

Так як розглядається ємнісний чутливий елемент системи стабілізації дана установки дозволяє здійснювати вібраційний вплив, з різною частотою коливань, фіксувати та досліджувати вихідні дані, які отримані в результаті роботи ЄЧЕ.

Таким чином визначається значення частоти та значення вихідного сигналу, після чого здійснюється його оцінка та визначення особливостей роботи. Наприклад таким чином можна визначити максимальне значення частоти вібраційного впливу при якому досліджуваний чутливий елемент здатний зберігати оптимальний показник точності вимірювання, а також визначити частоти при яких можуть виникати значні похибки.

У даному випадку у якості відтворення даних вимірювання з ЄЧЕ використовується осцилограф, який відображає показання вимірювання, але також може використовуватися ЕОМ, або інший обчислювальний прилад, який здатний фіксувати, обробляти та відтворювати вимірювальний сигнал.

### **4.3. Опис генератора механічних коливань**

У складі установки для дослідження характеристик ємнісного чутливого елемента зазначено про використання вібростенда (генератора механічних коливань), у даному випадку використовується установка ГМК-1 (див. рис. 4.2). Діапазон коливань даного вібраційного стенду визначений у межах  $20/20 \cdot 10^3$  Гц.

Установки ГМК-1 містить два магнітопроводи, відповідно 8 та 10, які жорстко закріплені. У такому поєднанні вони утворюють єдиний соленоїд у середині якого переміщується стрижень 7.

Цей стрижень рухається у результаті впливу сили, яка утворюється між генераторними обмотками збудження  $\text{III}_1$  та  $\text{III}_2$  1 та 3 та обмотками керування  $\text{III}_1$  та  $\text{III}_2$ .



Описаним чином відбувається перетворення напруги збудження у процес механічного переміщення стрижня.

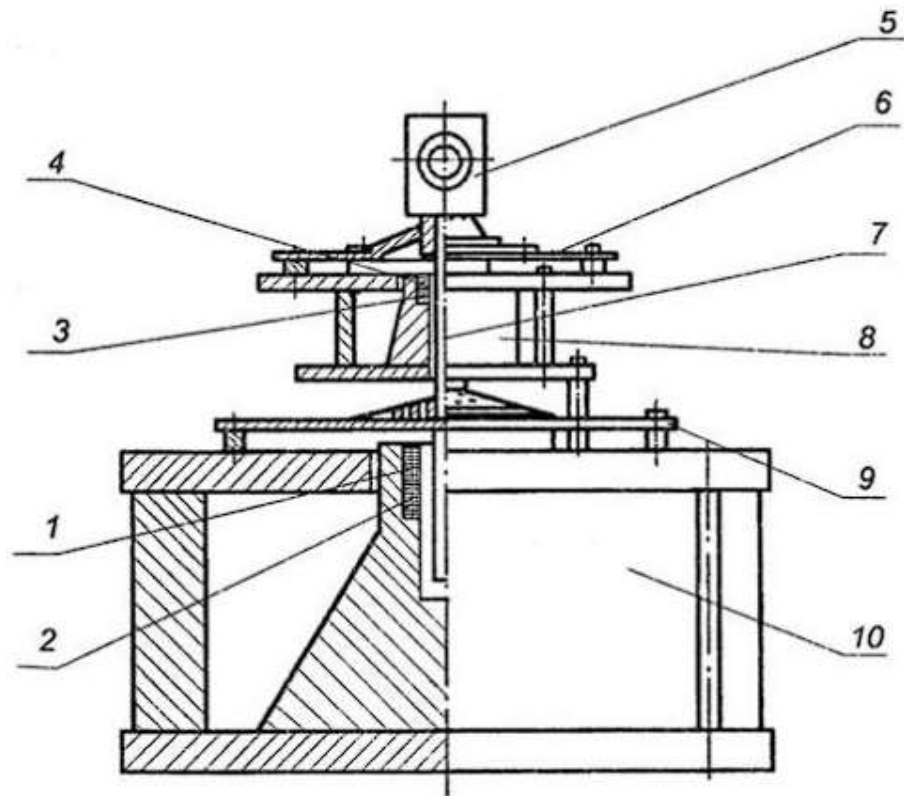


Рисунок 4.2. - Генератор механічних коливань ГМК-1:

- 1, 3 - генераторні обмотки  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ ;
- 2, 4 - обмотки управління  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ ;
- 5 - робочий стіл вібростенда;
- 6, 9 - гнучкі мембрани;
- 7 - стрижень;
- 8, 10 - магнітопроводи.

Завдяки тому, що стрижень зафіксований його переміщення може виконуватися лише в одному напрямі, а саме вздовж вертикального напрямку. Таким чином системи дозволяє генерувати вібрації правильно і тільки в одному напрямку.

Вібрації виникають у результаті дії стрижня на робочий стіл 5, на якому розташований досліджуваний чутливий елемент.

Індукційні перетворювачі  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$  призначені для створення коливальних прискорень стрижня та відповідно робочого стола.

Відповідно визначено що амплітуда вібраційних коливань ємнісного ЧЕ пропорційна напрузі  $U_{\text{ЧЕ}}$ . Для визначення вихідної напруги на відповідних частинах стенду використовуються вольтметри. Вихідний сигнал, а саме напруга, ємнісного ЧЕ реєструється з використанням осцилографа або іншої обчислювальної системи.

Вимушені коливання виникають у процесі впливу на масу чутливого елемента певної сили (див. рис. 4.3), наприклад вібрації.

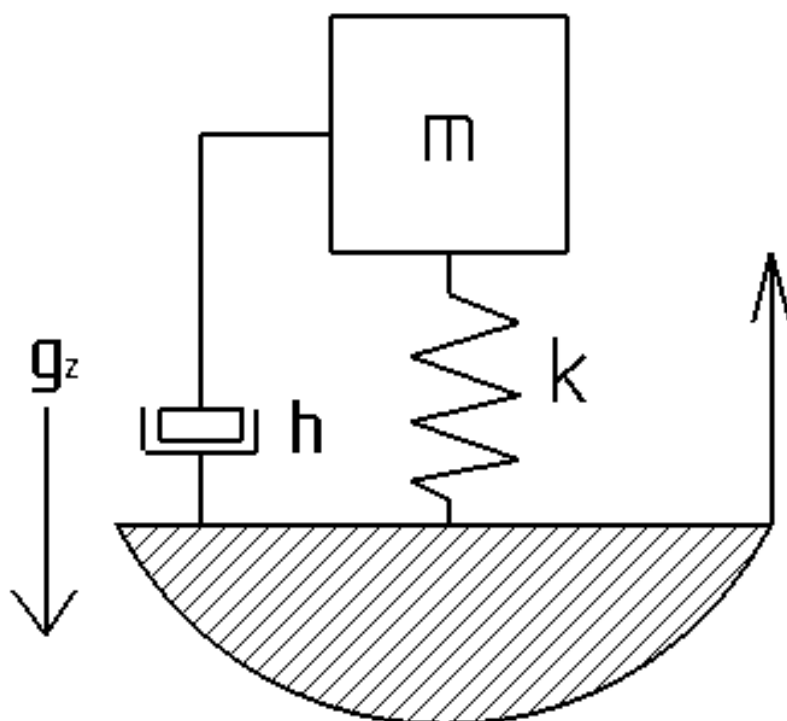


Рисунок 4.3. Коливальна система чутливого елемента

Для того, щоб забезпечити роботу даної коливальної системи потрібно дотримання переліку наступних умов, а саме:

- рух маси розглядається в ІС;
- рух маси здійснюється тільки в одному напрямку, а саме перпендикулярно до ЧЕ, у даному випадку це дія по горизонтальній осі;

- опора та інші складові є недемпфованими. Варто зазначити що у реальних системах завжди є причина виникнення демфуючих факторів, тому недемпфовані коливання актуальні при теоретичному аналізі та формуванні загальних аспектів роботи досліджуваних систем та чутливих елементів;

- маса пружного елемента повинна бути меншою за масу  $m$ ;

- у межах допустимих значень коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента;

- маса, значення коефіцієнта пружності та демпфування не змінні протягом часу.

Матимемо наступне рівняння, яке описує рух даного чутливого елемента:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = ma_z, \quad (4.1)$$

відповідно  $m$  - маса ЧЕ;

$h$  - коефіцієнт затухання;

$k$  - коефіцієнт пружності.

Варто зазначити що коефіцієнт пружності має різне значення у залежності від матеріалу з якого виготовлено чутливий елемент. Також від обраного матеріалу залежить низка інших параметрів ЧЕ, наприклад провідність.

Також варто врахувати інерційність перших двох складових, тому:

$$x = \frac{1}{w_0^2 a_z} \quad (4.2)$$

І враховуючи усі вище розглянуті фактори отримаємо наступний вираз:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \zeta w_0 \dot{x} + w_0^2 x = a_z, \quad (4.3)$$

відповідно  $\zeta$  - коефіцієнт демпфування;

$w_0^2$  - власна частота досліджуваного чутливого елемента.

#### 4.4. Розрахунок ємнісного чутливого елемента. Принцип дії

Розрахунки ємнісного ЧЕ необхідні для розуміння його принципу дії та особливостей роботи.

Ємнісний ЧЕ зазвичай складається з двох основних елементів - двох електродів та діелектрика, який розміщено між ними. При зміні відстані між електродами змінюється ємність елемента. Ця зміна ємності викликає зміну електричної ємнісної рефракції, яку відповідно можна визначити та виміряти.

Виконає розрахунок параметрів ЄЧЕ за наступних вхідних даних:

- частота джерела живлення  $f = 1200$  Гц;
- напруга живлення джерела  $U = 2$  В;
- площа поверхні пластики  $S = 3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;
- відстань між пластинами  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м;
- середовище між обкладками ємнісного перетворювача - вакуум.

Розрахуємо значення ємності чутливого елемента використовуючи наступний вираз:

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}, \quad (4.4)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність вакууму;

Значення діелектричної проникності в вакууму визначається за наступною формулою:

$$\varepsilon = \frac{1}{36 \cdot 10^9 \pi}, \frac{\Phi}{\text{м}}, \quad (4.5)$$

Відповідно будемо мати наступне значення розрахунку:

$$C = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{36 \cdot \pi \cdot 10^9 \cdot 0,501 \cdot 10^{-6}}, = 56 \text{ пФ}, \quad (4.6)$$

Наступним етапом варто виконати розрахунок кутової частоти напруги чутливого елемента за формулою:

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (4.7)$$

Відповідно будемо мати наступне значення:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 1200 = 0,75 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$$

Виконаємо розрахунок активного опору даного чутливого елемента. Для розрахунку використовується наступна формула:

$$R = \frac{1}{\omega C}, \quad (4.8)$$

Відповідно будемо мати наступний результат:

$$R = \frac{1}{0,75 \cdot 10^4 \cdot 5301 \cdot 10^{-12}} = 2,501 \text{МОм}$$

Наступним етапом треба розрахувати значення потужності, що розсіюється на активному опорі. Відповідно маємо наступний вираз:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (4.9)$$

Відповідно маємо наступний результат:

$$P = \frac{2^2}{2,5 \cdot 10^6} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Розраховуємо значення сили зворотного впливу використовуючи наступний вираз:

$$F = \frac{d}{d\delta} \left( \frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2 C}{2 \delta}, \quad (4.10)$$

В результаті маємо значення:

$$F = 0,201 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

#### **4.5. Використання двоканального MEMS акселерометра у системі вимірювання гравітаційного прискорення**

Двоканальний MEMS акселерометр може бути використаний у системі вимірювання гравітаційного прискорення для пошуку корисних копалин. Відповідно такий пристрій може бути корисним для застосування у геологічних дослідженнях і для видобутку рудних ресурсів.

У складі такої системи використовується двоканальний ємнісний гравіметр, який і призначений для вимірювання гравітаційного прискорення.

Відповідно у кожному каналі такого гравіметра встановлені ідентичні ємнісні гравіметри з одним каналом, між якими встановлено діелектрик.

Маємо інерційні маси  $m_1$  та  $m_2$ , які прикріплені до рухомої пластини, що під впливом гравітаційного прискорення змінюється відстань між пластинами конденсатора що і змінює його ємність.

Зміна ємності ЧЕ конвертується у значення напруги. Отримані значення напруги з двох однотипних елементів підсумовується і в результаті отримуємо один вихідний сигнал - подвоєний сигнал прискорення вільного падіння. Використання такого підходу дозволяє підвищити точність вимірювання та зменшує помилки.

У таблиці нижче продемонстровано значення аномалії прискорення вільного падіння у залежності від глиби та розміру родовища.

Таблиця 4.1. Аномалії прискорення вільного падіння в залежності від глибини та розміру родовища

Глибина залягання, м	Радіус родовища, м									
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
10	0.00001	0.00004	0.00014	0.00033	0.00064	0.00110	0.00175	0.00261	0.00372	0.00510
20	0.00000	0.00002	0.00007	0.00017	0.00032	0.00056	0.00089	0.00132	0.00188	0.00258

Таблиця 4.1. Продовження

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

#### 4.6. Висновки до розділу 4

У цій частині розглянуто питання засобів та методів проведення дослідження для визначення характеристик та робочих параметрів ємнісного чутливого елемента.

Зокрема розглянуто установки для досліджень, яка призначена для генерації та фіксації вхідних та вихідних параметрів досліджуваного чутливого елемента. Так як у даному випадку досліджується питання системи стабілізації на базі двоканального ємнісного МЕМС ЧЕ тому дослідження проводиться з врахуванням вібраційного впливу та здатності елемента видавати точні показники в межах допустимих значень.

Розглянуто принцип роботи генератора механічних коливань та його використання у дослідженнях чутливих елементів на вплив вібрації. Розглянуто принцип коливальної системи ЧЕ.

Проведення даного дослідження з вібраційною установкою є важливим та необхідним для розуміння принципу роботи та підтвердження надійності і точності роботи такої системи.



## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ МЕМС ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА»

### 5.1. Опис ідеї проекту

Ідеєю стартапу є система стабілізації, які стали дуже важливими складовими сучасних пристроїв та апаратів. Вони впроваджуються всюди, де є потреба отримати стабільну позицію.

У даному розділі було створено проєкт стартапу, де буде сформовано основну ідею, визначено інновацію, аудиторію клієнтів, основні показники та параметри, виконано порівняння з аналогами, визначена різних сторін та аспектів тощо.

У якості чутливого МЕМС ємнісного перетворювача з двома каналами, що забезпечує кращу точність та надійність вимірювання.

У межах цього підрозділу виконується формування ідеї створимо таблицю опису ідеї (табл. 5.1)

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проєкту [19]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та побудова системи стабілізації з використанням ємнісного чутливого елемента	1. Стабілізація камер	Забезпечення стабільності зйомки
	2. Медичні прилади	Забезпечення точності обладнання для проведення операцій
	3. Промисловість	Уникнення впливу вібрацій та коливань

Таблиця 5.2. Інформаційна карта стартап-проєкту [19]

Назва проєкту	Ємнісний МЕМС чутливий елемент
Автори	Тесленко Д.В., Безвесільна О.М.
Анотація	Розроблений пристрій дозволяє забезпечити високу точність та стабільність роботи у різних системах, зокрема для стабілізації
Термін реалізації	8 місяців
Необхідні ресурси	Фінансові
Опис проблеми, яку вирішує стартап-проєкт	Надає високу точність та надійність процесу стабілізації
Ціль	Збільшити точність та зменшити похибку вимірювання
Очікуваний результат	Розширення сфери використання МЕМС чутливого елемента

Аналізуємо техніко-економічні переваги даної ідеї проєкту у порівнянні з пропозиціями конкурентів:

1) визначення перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

2) визначення попереднього кола конкурентів (проєктів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проєкту та проєктів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

3) проведення порівняльного аналізу показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [19]

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Zhiyun	DJI			
1.	Ціна	Низька	Середня	Середня			+
2.	Габаритні розміри	Малі	Малі	Малі		+	
3.	Складність виготовлення	Середня	Проста	Проста	+		
4.	Точність роботи	Високо-точний	Точний	Точний			+
5.	Надійність роботи	Висока	Висока	Висока		+	
6.	Чутливість до зовнішніх чинників	Низька	Низька	Низька		+	

Відносно розглянутих конкурентів пропонована система має значну перевагу у вартості та точності роботи, що розширює спектр систем які надають якісний продукт за низькою ціною. Певним недоліком можна вважати середню складність виготовлення, що обумовлюється технічними можливостями. Також системи надає високу надійність, відсутність впливу чинників та малі габарити.

Технологічний аудит представляє собою проведення певної оцінки потенціалу та можливостей, у даному випадку для стартапу. В межах підрозділу буде описано ідею щодо створення продукту, а також розглянуто технології її реалізації (табл. 5.4)

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проєкту [19]

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Використання високоточного акселерометра для визначення орієнтації	Використання мікроконтролера 32-біт ARM і програмованого методу роботи	Наявні	Доступна
2.	та подальшого здійснення керування процесом стабілізації	Використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi і програмованого методу роботи	Наявні	Доступна
3.		Використання мікроконтролера 8-біт AVR і програмованого методу роботи	Наявні	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: обрано 1				

Проаналізувавши таблицю можна сказати, що найкращий варіант реалізації є перший, так як використання такого мікроконтролера є оптимальним, надійним та якісним вибором, а також вони мають невелику ціну, що робить їх популярними. Усі необхідні технології та методи для реалізації ідеї наявні та можуть бути застосованими.

## 5.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У підрозділі досліджують та визначаються ринкові можливості та загрози, що позитивно та негативно впливатимуть на стартап.

Виконаємо попередній опис характеристики потенційного ринку стартап-проєкту (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [19]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	12000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція серед внутрішніх та зарубіжних компаній
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або ринку), %	35

Дана характеристик описує загальну ринкову ситуацію у галузі. Зокрема маємо певну кількість гравців на ринку, які надають товари такого ж призначення, визначено динаміки ринку (зростаюча), та відповідно рентабельність у 35%. Особливі вимоги щодо систем стабілізації відсутні. Надалі аналізуємо потенційні групи клієнтів та їх характеристики (табл. 5.6).

Таблиця 5.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту [19]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
1	Підвищення рівня точності стабілізації систем які вимагають стійкого і точного позиціонування	Фотографи	Використання для пристрою для стабільності кадру та статичності	Висока точність позиціонування, малі розміри, низька ціна, стабільність роботи, надійність
2		Медичні працівники	Використовують пристрій для стабілізації і позиціонування обладнання	
3		Виробничі підприємства	Використання для забезпечення стійкості при вібраціях	

У даному випадку основною цільовою групою обрано першу, так як вона має нижчі вимоги щодо стандартизації, відсутні спеціальні вимоги наприклад як в медичній чи промисловій сфері. Саме виготовлення систем для цієї спеціалізації дозволить розвивати проєкт.

При застосування мають місце певні загрози (табл. 5.7)

Таблиця 5.7. Фактори загроз [19]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Падіння актуальності	Зниження продажів	Проведення оптимізації та покращення
2	Ремонт та обслуговування	Вихід з ладу, падіння точності та стабільності	Створення центрів технічного обслуговування
3	Конкуренція	Зниження продажу	Проведення оптимізації та покращення, впровадження нових функцій
4	Відсутність фінансового забезпечення	Проблема закупівлі та обслуговування обладнання	Пошук інвесторів
5	Недостатня точність	Стабілізація не відповідає вимогам за ситуацією	Пошук методів підвищення точності чутливого елемента

Таблиця 5.8. Портрет цільового покупця [19]

Що хочуть купити	Систему стабілізації
Хто покупець	Підприємства, фізичні особи
Мета купівлі	Забезпечення оптимального рівня стабілізації приладу
Коли покупець купує продукт	Коли є необхідність точного позиціонування
Де покупець бажає придбати продукт	В інтернеті
Мета стартапу	Задовільнити потребу потенційного клієнта в системах стабілізації

Основними загрозами вважаються падіння популярності та незацікавленість людей у використанні та впровадженні інтелектуальних систем керування енергобезпекою. Це обумовлено власними переконаннями, незнанням та нерозумінням цих систем. Для того, щоб мінімізувати його вплив треба проводити агітацію та пропагування питань екології та раціонального використання енергоресурсів.

Перейдемо до опису факторів потенційних можливостей (табл. 5.9)

Таблиця 5.9. Фактори можливостей [19]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання рівня стабільності	Забезпечення роботи за різного роду зовнішніх впливів	Пошук методів покращення точності та стабільності
2	Впровадження покращень	Зростання характеристик продукту	Дослідження нових методів стабілізації
3	Забезпечення підтримки користувачів	Відкриття сервісних центрів обслуговування та технічної підтримки	Забезпечення сервісного обслуговування
4	Зростання попиту	Збільшення обсягів виробництва та продажів	Інтеграція нових засобів та технологій виробництва для забезпечення кращої якості
5	Зростання рівня точності	Забезпечує розширення сфери застосування	Дослідження методів збільшення точності

Виконавши аналіз загроз та можливостей можна визначити, що присутній певний перелік потенційних загроз, які можуть виникати з різних причин, зокрема це пов'язано з вимогами користувачі та конкуренцією, але існує можливість їх мінімізації. Також визначено перелік можливостей, зокрема щодо розширення діяльності з сервісного обслуговування, забезпечення кращої точності та стабільності.

Виконаємо пункт ступеневий аналіз конкуренції на ринку (табл. 5.10) для визначення особливостей ринку та його тенденцій.



Таблиця 5.10. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [19]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Чиста конкуренція	Обмежена кількість компаній, що виготовляють систему	Підвищення рівня якості та потенційне зниження вартості
Рівень конкурентної боротьби - глобальний	Виготовлення продукції в різних країнах	Дії щодо покращення технологічних параметрів, включно з виробництвом
Конкуренція за галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Охоплює галузь точних систем	Розробка нових високоточних методів та їх реалізації
Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Між товарами одного виду	Впровадження нових технологій
За характером конкурентних переваг - цінова	Ціна впливає на темп і потенціал збуту товару	Аналіз цінових категорій аналогів, адаптація
За інтенсивністю - марочна	Ресстрація торгової марки	Впливає у якості зростання впізнаваності компанії та довіри до її послуг

На сьогоднішній день існує достатня кількість компаній, які займаються виробництвом та розповсюдженням систем стабілізації, відповідно має місце чиста конкуренція, яка є товарно-видовою та внутрішньогалузевою. Рівень конкурентною боротьби є глобальним оскільки немає обмеження за країнами де система використовуються.

Після, виконаємо аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.11)

Таблиця 5.11. Аналіз конкуренції у галузі за М. Портером [19]

Складові аналізу	Прямі конкуренти у галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Zhiyun DJI	Наявність аналогів у конкурентів	Поставки товарів	Досвід користування, відгук, статистика	Виробники дешевих та простих рішень
Висновки:	Маємо середню інтенсивність конкуренції. Не є загрозливою	Поширені на великих ринках. Можливість вийти на ринок за рахунок покращення точності	Можуть вплинути на ціну	Визначають вектор розвитку	Не обмежують стартап

Основними ризиками є потенційні конкуренти та прямі конкуренти, так як вони здатні створювати високоякісний продукт, який може переважати власний. Також має вплив зміна вартості комплектуючих.

Проводимо обґрунтування факторів конкурентоспроможності (табл. 5.12), яке дозволить оцінити здатність проекту до конкурентоспроможності.

Таблиця 5.12. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [19]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість	Якість є основним параметром вибору
2	Універсальність	Забезпечує різноманітність застосування
3	Новизна	Використовує новітні методи для стабілізації
4	Точність	Забезпечує високий рівень точності і результат
5	Стабільність	Забезпечує безперебійність роботи

Таблиця 5.13. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін [19]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Фактор конкурентоспроможності у порівнянні з Zhiyun						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість	18				+			
2	Універсальність	13						+	
3	Новизна	12				+			
4	Точність	20							+
5	Стабільність	16					+		

Побудуємо таблицю SWOT-аналізу (табл. 5.14).

Таблиця 5.14. SWOT- аналіз стартап-проекту [19]

Сильні сторони: 1. Універсальність 2. Точність 3. Стабільність	Слабкі сторони: 1. Падіння попиту 2. Конкуренція 3. Відсутність фінансового забезпечення
Можливості: 1. Зростання рівня стабільності 2. Впровадження покращень 3. Забезпечення підтримки користувачів 4. Зростання попиту 5. Зростання рівня точності	Загрози: 1. Падіння актуальності 2. Ремонт та обслуговування 3. Конкуренція 4. Відсутність фінансового забезпечення 5. Недостатня точність

На основі цієї таблиці виконується формування альтернативи ринкового впровадження. Перейдемо до побудови відповідної таблиці (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту[19]

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкової поведінки)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	3 міс.
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1 міс.
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	1 міс.

З перелічених альтернатив було обрано стратегію компенсації слабких сторін стартап-проекту за рахунок наявних ринкових можливостей.

### 5.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

На початку розроблення ринкової стратегії проекту проведемо вибір цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.17).

Таблиця 5.17. Вибір цільових груп потенційних споживачів [19]

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Фізичні особи	Так	Висока	Висока	Середньо
2	Підприємства	Так	Висока	Висока	Середньо
3	Медичні установи	Так	Висока	Висока	Складно
Як цільові групи обрано: Обрано як цільова група потенційних клієнтів фізичні особи					

У результаті аналіз цільових груп обрано фізичних осіб. Вибір зроблений на основі того, що на даному сегменті нижчі вимоги щодо стандартів та стабільності, та має нижчий рівень входу.

Перейдемо до формування базової стратегії розвитку (табл. 5.18)

Таблиця 5.18. Визначення базової стратегії розвитку [19]

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Стратегія диференційованого маркетингу	Точність Стабільність Універсальність Якість	Стратегія диференціації

Наступним кроком виконуємо визначення базової стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.19)

Таблиця 5.19. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [19]

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Шукати нових та забирати існуючих	Технічні показники точності, надійності, розміри	Стратегія заняття конкурентної ніші

У якості базової стратегії було обрано стратегію заняття конкурентної ніші, оскільки цей підхід дозволить зосередитися на адаптації під вимоги користувачів, покращення параметрів та показників точності системи і стабільності.

Відповідно на основі вимог споживачів з сегменту до постачальника і самого продукту, а також у залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки виконуємо розробку стратегії позиціонування продукту.

Таблиця 5.20. Визначення стратегії позиціонування [19]

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якісний та надійний виріб за низьку ціну	Стратегія диференціації	Здійснення оптимізації, щодо параметрів, під вимоги користувачі	Надійність Якість Ціна
2	Точний засіб позиціонування за прийнятну ціну		Здійснення досліджень щодо покращення показників точності стабілізації	Точність Стабільність Ціна

У результаті виконання даного підрозділу було отримано систему рішень, щодо ринкової поведінки, та визначено напрямки розвитку та позиціонування себе у цільовому сегменті.

#### 5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

На початку підрозділу виконується визначення ключових переваг концепції для продукту (табл. 5.21). Цей етап є першим кроком розробки маркетингової концепції товару. Вона передбачає розгляд вимог користувача щодо показників системи і його потреб загалом.

Таблиця 5.21. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [19]

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якісна та надійна система яка здатна забезпечувати стабільну позицію та мати низьку вартість	Надання якісної та надійної системи для стабілізації об'єкта	Висока якість та надійність, хороший рівень стабілізації та стійкості до агресивних умов роботи
2	Високоточний пристрій стабілізації з високим рівнем якості та надійності	Надання високоточної системи позиціонування	Висока якість та точність, забезпечення стабільної роботи у різних умовах та середовищах

Описана система здатна задовільнити визначені потреби користувачів у сегменті, так як система є високоточною, стійкою, надійною та відносно дешевою. Поєднання цих показників може забезпечити актуальність для ширшого спектра застосування.

Таблиця 5.22. Опис трьох рівнів моделі товару [19]

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Забезпечення високого рівня функціональності роботи системи, низького енергоспоживання ресурсів та забезпечення високої продуктивності з використанням інтелектуальних алгоритмів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Ор
	1. Точність	М	Тх
	2. Надійність	М	Тх
	3. Економічність	Нм	Е
	4. Стабільність	М	Тх
	5. Універсальність	М	Тх
	Якість: стандарт захисту системи IP67		
	Пакування: картонна упаковочна коробка, захисний матеріал наповнювач		
	Марка: Universal Stabilization		
III. Товар з підкріпленням	До продажу: загальна перевірка, контроль якості		
	Після продажу: технічне обслуговування, послуги відправки		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист патентом			

Визначено основні технічні характеристики та особливості розробленого продукту. Визначено стандарт якості для такого роду систем. Описано особливості пакування для забезпечення безпечного транспортування. До продажу є зобов'язання щодо перевірки усієї системи та контролю якості. Після продажу надаються послуги технічного обслуговування та відправка.

Таблиця 5.23. Визначення меж встановлення ціни [19]

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	7000-15000 грн.	10000-18000 грн.	8000-30000 грн.	6000-10000 грн.



Основним каналом збуто обрано компанію, так як цей варіант на даний момент є оптимальним та забезпечує відповідний рівень контролю збуто. Постачальник повинен забезпечити перед відправкою перевірку відповідності, упакувати та відправити товар.

Таблиця 5.24. Календарний план-графік підготовки стартап-проекту [19]

Стадія стартапу	Період запуску (за місяцями з початку підготовки проекту)					Вартість стадії, грн
	1	2	3	4	5	
Передпосівна	01.01.24 31.01.24					-
Посівна		01.02.24 01.03.24				20000
Прототипування			01.03.24 01.05.24			80000
Закрита бета-версія				01.05.24 01.06.24		100000
Ведення бізнесу					від 01.06.24	200000
Разом						400000

Виконаємо формування системи збуто для стартап-проекту (табл. 5.25).

Таблиця 5.25. Формування системи збуто [19]

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуто, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуто	Оптимальна система збуто
1	Регулярні поставки	Відправка продукту, встановлення та перевірка, налаштування, встановлення необхідного програмного забезпечення	Нульового рівня	Пряма
2	Передзамовлення	Відправка продукту, встановлення та перевірка, налаштування, встановлення необхідного програмного забезпечення	Нульового рівня	Пряма

Виробник являється безпосереднім каналом збуту даної пропозиції, про що вказує нульовий рівень глибини каналу збуту. Оптимальною системою збуту є пряма система.

Таблиця 5.26. Початкові вкладення на запуск стартап-проєкту [19]

Види витрат	Вартість
НДДКР	5000
Захист прав на об'єкти інтелектуальної власності	10000
Створення робочого прототипу, проведення експериментальних досліджень	80000
Просування проєкту	40000
Витрати на утримання команди	40000
Закупівля обладнання	50000
Орієнтована собівартість першого продукту	10000
РАЗОМ	235000
Витрати які бере на себе стартапер	75000
Необхідні інвестиції	160000

Опишемо концепції маркетингових комунікацій (табл. 5.27).

Таблиця 5.27. Концепція маркетингових комунікацій [19]

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Потребують якісної системи для забезпечення стабілізації у своїх персональних або особистих цілях	Інтернет, соціальні мережі, конференції	Висока надійність Висока точність Висока якість Низька ціна	Надати більше інформації про товар та його переваги	Показ роботи системи, її показників у мережі інтернет та спеціальні хостинги

Основною концепцією є забезпечення хорошого сприйняття продукту шляхом демонстрації функціональності, процесу роботи, показників які були отримані. Наприклад демонстрація якості зображення при використанні системи стабілізації для камери. Показ відбувається зазвичай через мережу інтернет та соціальні мережі, можуть бути використані ознайомчі відео.

## **5.5. Висновки до розділу**

Розділ було присвячено розробці стартапу на тему система стабілізації з MEMS ємнісним перетворювачем, де було розглянуто та оцінено доцільність та конкурентоспроможність впровадження цього рішення. Загальні аспекти які були розглянуті це вибір аудиторії, позиціонування продукту, економічні та організаційні питання ведення стартапу, стратегії щодо просування та взаємодії з клієнтами, а також з конкурентами.

Першим етапом виконано деталізований опис ідеї та її аналіз, вибір кращої технології з наявних для стартапу. Визначено рівень конкурентного середовища, рентабельність, кількість основних конкурентів та інші аспекти.

Було проведено техніко-економічний аналіз, визначено характеристики продукту конкурентів та здійснено порівняння для визначення сильних та слабких сторін. Запропонована система має кращі показники надійності, точності, завадостійкості, а також здатна забезпечити значний діапазон вимірювання.

Проведено аналіз ринкових можливостей. Враховано потенційні потреби цільової аудиторії. Визначено шляхи покращення. Виконано ступеневий SWOT-аналіз для систематизації даних щодо слабких та сильних сторін, а також можливості і загрози. У результаті визначено шляхи покращення та уникнення впливу загроз.

Розглянуто ринкові стратегії, обрано відповідні для даного проєкту. Проведено вибір концепція, та розглянуто ключові переваги їх вибору. Побудовано системи трьох рівнів моделі.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації проведено дослідження двоканального ємнісного МЕМС чутливого елемента автоматизованої системи стабілізації. Це дослідження розширює питання розробки та впровадження ЄЧЕ у різного роду системи стабілізації для яких існує вимога забезпечення високої точності, надійності та мінімізації впливу навколишніх чинників. Зокрема даний досліджуваний ЧЕ є двоканальним, завдяки чому і відбувається покращення точності шляхом мінімізації впливу температури, різних шумів чи негативних факторів.

У цій роботі описано та розглянуто наступний перелік матеріалів та аспектів щодо досліджуваної системи:

- розглянуто питання процесу стабілізації загалом та методів стабілізації. Розглянуто актуальне на даний момент часу питання системи стабілізації озброєння, наведено їх класифікацію. Розглянуто основні функції системи стабілізації, а також їх призначення;

- розглянуто конструкцію чутливого елемента стабілізації та його принцип дії. Описано різновиди таких чутливих елементів. Приділено основну увагу двоканальному ємнісному МЕМС ЧЕ автоматизованої системи стабілізації;

- наведено математичний опис принципу роботи ємнісного МЕМС ЧЕ, розглянуто основні аспекти та вирази які описують перетворення величин та отримання вихідного значення ємнісного чутливого елемента. Розглянуто основні аспекти ЄЧЕ, його конструкції особливості та відмінності у математичному описі у залежності від типу;

- описано особливості виконання дослідження даного чутливого елемента. Розглянуто принципи його проведення, обладнання яке використовується то його структура. Описано принцип отримання даних та їх інтерпретація. Розглянуто питання дослідження вібраційного впливу на результати вимірювання та точність даного ЄЧЕ;

- розглядається питання побудови стартап-проекту на основі використання системи стабілізації з описаним ємнісним МЕМС ЧЕ. Описано сфери впровадження системи, особливості ринку. Розглянуто переваги та недоліки системи у порівнянні з аналогами на ринку. Описано потенційні загрози та можливості для даного стартапу. Побудовано стратегії позиціонування товару та компанії, просування на ринку, взаємодії з конкурентами та потенційними клієнтами. Визначено що система є конкурентоспроможною та актуальною на ринку, що надає можливість для розвитку стартапу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Ткачук А.Г., Добржанський О.О., Коваль А.В., Богдановський М.В. Розробка нового чутливого елемента комплексу стабілізації озброєння. Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2019. Том 30(69). №5. С. 23-28;
- 2) Ткачук А.Г., Безвесільна О.М., Гуменюк А.А., Янчук В.М., Крижанівська І.В. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння. Науковий журнал «Технічна інженерія». 2020. Вип. 2(86). С. 73-80;
- 3) Безвесільна О. М., Козюков Д.С. Система стабілізації озброєння з ємнісним МЕМС чутливим елементом. Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення - 2017», ЖДТУ, 2017. С.112-113. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/7213>;
- 4) Безвесільна, О.М., Коротченко, Н.П. Конструкція та переваги оптичного акселерометра. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки; Т.1. ЖДТУ. 2015. С.100-101. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/1229>;
- 5) Tarasenko, A. (2008), «Bronetankovaya tekhnika Ukrainy: itogi, potentsial, perspektivy», Bronetankovaya tekhnika Ukrainy, No. 4, pp. 29–35, [Online], available at: <http://militaryarticle.ru/tekhnika-i-vooruzhenie/2008/11678-bronetankovaja-tehnika-ukrainy-2>;
- 6) Безвесільна, О.М., Хильченко, Т.В. Двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр. Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційно-комп'ютерні технології - 2016". ЖДТУ. С. 163. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/3398>;
- 7) Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2002. – 264 с.

8) Гірняк Ю. Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні // Вимірювальна техніка та метрологія - Львів. - 2008. - Вип.69. – С. 97-102;

9) Коротченко Н.П., Безвесільна О.М. Конструкція оптичного акселерометра. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 11-12 грудня 2013. С. 100-101;

10) Добржанський О.О. Дослідження можливості побудови системи прогнозування та автоматичної компенсації накопичених похибок інтегруючих гіроскопічних акселерометрів. Технічні науки. Вісник ЖДТУ №2 (53). 2010. С. 78-85;

11) Теслюк В. М. Розрахунок та аналіз вихідних параметрів мікроакселерометра ємнісного типу / В. М. Теслюк, Р. В. Загарюк, Ю. О. Кушнір // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". - 2007. - № 591 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. - С. 123-129;

12) Нічик, В. Ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотного літального апарату / В. Нічик, О. М. Безвесільна, С. О. Нечай // XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - С. 144-148. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35169>;

13) Безвесільна О.М., Толочко Т.О., Тесленко Д.В. Основні конструктивні різновиди ємнісного перетворювача // Тенденції розвитку технологій в автоматизації, приладобудуванні та робототехніці : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 травня 2023 р. – Житомир : ЖДТУ, 2023. – С. 104-105.;

14) Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. Новий прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння: монографія з грифом Державного університету «Житомирська політехніка». – 2022. – 272 с.;

15) Ткачук А.Г., Безвесільна О.М., Гуменюк А.А., Богдановський М.В. Дослідження методів фільтрації вихідного сигналу чутливого елемента системи стабілізації озброєння. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2020. Вип. 6. С. 116-123;

16) Безвесільна О. М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2017. - 181 с.;

17) 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.;

18) Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О., Тимчик Г. С. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин. Інформаційно-комп'ютерні системи та технології: Підручник. - Житомир: ЖДТУ, 2011. – 876;

19) Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.