

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

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

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

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

**на тему: «Прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації  
легкої броньованої техніки»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-91

Крижановський Андрій Олексійович \_\_\_\_\_

Керівник:

д.т.н., проф.,

Безвесільна Олена Миколаївна \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доцент,

Козир Олег Васильович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2023 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1			Завдання на дипломний проєкт		
2	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ	Пояснювальна записка	92	
3	A1	ДПБ.ПМ-91.15.1760.002.СК	Складальний кресленик	1	Акселерометр
4	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.003.СК	Складальний кресленик	1	Чутливий елемент
5	A3	ДПБ.ПМ-91.15.1760.004	Кресленик деталі	1	Основа
6	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.005	Кресленик деталі	1	Кришка
7	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.006	Кресленик деталі	1	Маса інерційна
8	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.007	Кресленик деталі	1	Прокладка
9	A3	ДПБ.ПМ-91.15.1760.008	Кресленик деталі	1	Втулка
10	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.009	Кресленик деталі	1	Штир
11	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.010	Кресленик деталі	1	П'єзоелемент
12	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.011	Кресленик деталі	1	Шар провідник
13	A4	ДПБ.ПМ-91.15.1760.012.СП	Специфікація	1	
14	A1	ДПБ.ПМ-91.15.1760.013.СхІ	Схема ілюстративна	1	Рознесений вид
15	A2	ДПБ.ПМ-91.15.1760.014.СхІ	Схема ілюстративна	1	Графік
16	A1	ДПБ.ПМ-91.15.1760.015.СхІ	Схема ілюстративна	1	З'єднання пластин

				ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ			
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту		Лист	Листів
Розробн.	Крижановський А.О.						
Керівн.	Безвесільна О.М.						
Консульт.							
Н/контр.							
Зав.каф.	Киричук Ю.В.						
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-91			

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту**

**на тему: «Прецизійний чутливий елемент  
автоматизованої системи стабілізації  
легкої броньованої техніки»**

Київ – 2023 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

**Крижановському Андрію Олексійовичу**

1. Тема проєкту «Прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації легкої броньованої техніки», керівник проєкту д.т.н., професор, Безвесільна Олена Миколаївна, затверджені наказом по університету від « 30 » травня 2023 р. № 2057-с

2. Термін подання студентом проєкту 15 червня 2023

3. Вихідні дані до проєкту: габаритні розміри ПА – не більше 50x50 мм; маса ПА - до 0,2кг; інерційна маса до 0,05 кг; робочий частотний діапазон – (1-8) кГц; тип конструкції ЧЕ – пакетний п'єзоелемент; робоча температура - +20<sup>0</sup> С.

4. Зміст пояснювальної записки: Перелік позначень та скорочень; Вступ; Проектно-аналітичний розділ; Огляд літературних відомостей; Опис принципу роботи п'єзоелектричного акселерометра; Розділ 2. Розробка тривимірної моделі ПА; Розробка математичної моделі ПА; Розробка конструкції чутливого елемента; Розробка конструкції п'єзоелектричного акселерометра; Розділ 3. Розрахунок характеристик та експериментальні дослідження чутливого елемента; Аналіз симуляції динамічного впливу вібрації на модель; Розрахунок параметрів проєктованого ЧЕ; Висновок до дипломного проєкту; Список літератури;

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Формат А1 – Складальний кресленик п'єзоелектричного акселерометра; формат А1 – кресленики деталей; формат А1 – кресленики деталей чутливого елемента та графіки аналізу вібрацій; формат А1 – схема ілюстративна рознесеного виду ПА; формат А1 – схема ілюстративна електричного з'єднання п'єзопластин; презентація PowerPoint.

6. Консультанти розділів проєкту\*

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

7. Дата видачі завдання 14 лютого 2023р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Одержання затвердженого завдання до дипломного проєкту	14.02.2023	
2	Огляд і аналіз технічних характеристик бойових модулів та систем стабілізації озброєння	15.02.2023 – 25.02.2023	
3	Опис принципу роботи прецизійного чутливого елемента, огляд типів конструкції, монтажу та вибір п'єзоматеріалу	25.02.2023 – 07.03.2023	
4	Розробка математичної та тривимірної моделі конструкції чутливого елемента та п'єзоелектричного акселерометра	08.03.2023 – 31.03.2023	
5	Дослідження впливу вібрації та гармонійних коливань на конструкцію ПА шляхом комп'ютерної симуляції	01.04.2023 – 14.04.2023	
6	Аналіз результатів комп'ютерного моделювання та симуляції динамічного впливу на модель	15.04.2023 – 30.04.2023	
7	Розрахунок параметрів чутливого елемента, опис схеми підключення у коло підсилення сигналу	01.05.2023 – 16.05.2023	
8	Розробка та оформлення графічного матеріалу	17.05.2023 – 31.05.2023	
9	Висновки та оформлення пояснювальної записки	01.06.2023 – 07.06.2023	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій КРИЖАНОВСЬКИЙ

Керівник

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олена БЕЗВЕСІЛЬНА

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

## АННОТАЦІЯ

*Проблематикою* дипломного проекту є дослідження та вдосконалення автоматизованої системи стабілізації озброєння легкої броньованої техніки з метою підвищення її точності та ефективності. В основу досліджуваних систем стабілізації покладено прецизійний чутливий елемент, що за своїм принципом роботи використовує п'єзоелектричні властивості. Пристроєм, що стане основоположним елементом досліджуваних систем стабілізації є п'єзоелектричний акселерометр (ПА).

В ході виконання було проведено огляд існуючих автоматизованих систем стабілізації, огляд принципу роботи чутливих п'єзоелектричних елементів, їх основних типів конструкції та монтажу, а також огляд властивостей основних відомих п'єзоелектричних матеріалів.

На основі розглянутого матеріалу було проведено проектування конструкції власного варіанту акселерометра, проведено моделювання його тривимірної моделі та дослідження зовнішніх впливів, дії яких його може бути піддано в програмному середовищі САПР Solidworks.

Було проведено розрахунок основних характеристик чутливого елемента, проведено вибір матеріалів для реалізації елементів конструкції п'єзоелектричного акселерометра а також розглянуто та обрано способи монтажу чутливого елемента до вимірюваної поверхні.

Розгляд основних математичних залежностей та отриманих характеристик проектованого ПА доводить підвищену чутливість ПА, що і є метою даної розробки.

**Ключові слова:** легка броньована техніка, бойовий модуль, чутливий елемент, п'єзоелектричний ефект, п'єзоелектричний акселерометр, Solidworks моделювання, аналіз вібрацій.

## ANNOTATION

*The issue* of the diploma project is research and improvement of automated systems of stabilization of weapons of light armored vehicles in order to increase their accuracy and efficiency. The researched stabilization systems are based on a precision sensitive element that uses piezoelectric properties according to its operating principle. A piezoelectric accelerometer is a device that will become a fundamental element of the studied stabilization systems.

In the course of the implementation, an overview of the existing automated stabilization systems, an overview of the principle of operation of sensitive piezoelectric elements, their main types of construction and installation, as well as an overview of the properties of the main known piezoelectric materials was carried out.

On the basis of the considered material, the design of the own version of the accelerometer was carried out, its three-dimensional model was modeled and the study of external influences to which it could be subjected in the Solidworks CAD software environment was carried out.

The calculation of the main characteristics of the sensitive element was carried out, the selection of materials for the implementation of the design elements of the piezoelectric accelerometer was carried out, and the methods of mounting the sensitive element to the measured surface were considered and selected.

Consideration of the main mathematical dependencies between the obtained characteristics of the designed PA proves the increased sensitivity of the PA, which is the goal of this development.

**Keywords:** light armored vehicle, combat module, sensitive element, piezoelectric effect, piezoelectric accelerometer, Solidworks modeling, vibration analysis.

# ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>10</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>11</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ПРОЕКТНО-АНАЛІТИЧНИЙ.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Огляд літературних відомостей відповідно до теми ДП.....</b>	<b>12</b>
1.1.1. Огляд існуючих бойових модулів та зразків ЛБТ, що використовують системи стабілізації .....	12
1.1.2 Огляд існуючих систем стабілізації озброєння.....	20
Висновки до розділу 1.1 .....	30
<b>1.2 Опис принципу роботи п'єзоелектричного акселерометра.....</b>	<b>31</b>
1.2.1 П'єзоелектричний ефект .....	31
1.2.2 Огляд відомих п'єзоелектричних матеріалів .....	35
1.2.3 Застосування п'єзоелектричного ефекту у п'єзоелектричних акселерометрах.....	44
1.2.4 Опис існуючих конструкцій п'єзоелектричних акселерометрів.....	45
1.2.5 Опис поширених методів монтажу п'єзоелектричних акселерометрів.....	49
Висновки до розділу 1.2. ....	52
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ ТА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ КОНСТРУКЦІЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1. Розробка математичної моделі ПА .....</b>	<b>53</b>
<b>2.2. Розробка конструкції чутливого елемента .....</b>	<b>57</b>
<b>2.3. Розробка конструкції п'єзоелектричного акселерометра.....</b>	<b>60</b>
2.3.1 Вимоги до габаритних розмірів та тривимірне моделювання .....	60
2.3.2. Принцип складання та пояснення конструкції .....	62

					<i>ДПБ.ПМ91.15.1760.001. ПЗ</i>				
Змін.	№ докум.	Підпис	Дата	Прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації легкої броньованої техніки			Арк.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Крижановський А.О.						8	92	
Перевірів	Безвесільна О.М.						НТУУ «КПІ», каф. АСНК, гр. ПМ-91		
Реценз.	Козир О.В.								
Н. Контр.									
Затвердив									



<b>2.4. Принцип внутрішнього електричного підключення пакетних п'єзоелементів. Принцип роботи. ....</b>	<b>64</b>
<b>Висновки до розділу 2.....</b>	<b>65</b>
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ У СКЛАДІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА.....</b>	
<b>3.1 Аналіз симуляції динамічного впливу вібрації на модель .....</b>	<b>66</b>
3.1.1. Визначення взаємозв'язків між компонентами. ....	68
3.1.2. Побудова полігональної сітки .....	69
3.1.3. Дослідження впливу вібрацій .....	70
3.1.4. Аналіз реакції на гармонійні коливання.....	75
<b>3.2 Розрахунок параметрів проєктованого ЧЕ.....</b>	<b>78</b>
3.2.1 Розрахунок заряду, напруги та ємності між обкладками однієї п'єзопластини .....	78
3.2.2 Еквівалентна схема підключення ПА .....	81
3.2.3 Структурна схема п'єзоелектричного акселерометра.....	84
<b>Висновки до розділу 3.....</b>	<b>89</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ.....</b>	<b>90</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>91</b>

## ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

*БМ* – бойовий модуль;

*ЛБТ* – легка броньована техніка;

*СО* – стабілізатор озброєння;

*СУВ* – система управління вогнем;

*ІМ* – інерційна маса;

*ПА* – п'єзоелектричний акселерометр

*ПЕ* – п'єзоелектричний елемент;

*ПМ* – п'єзоелектричний матеріал

*ПП* – перетворюючий пристрій;

*ППЕ* – прямий п'єзоелектричний ефект;

*ПТРК* - протитанковий керований ракетний комплекс

*ЧЕ* – чутливий елемент.

*d* – Товщина пластини п'єзоматеріалу

*F<sub>x</sub>; F<sub>y</sub>* – Сила, прикладена до ЧЕ

*m* – маса інерційного елемента;

*k* – коефіцієнт пружності

*S<sub>x</sub>; S<sub>y</sub>*; – площа поверхонь п'єзоелектричного ЧЕ;

*U<sub>вх</sub>* – вхідна напруга ЧЕ;

*U<sub>вих</sub>* – вихідна напруга ЧЕ;

*ω<sub>власна</sub>* – власна частота ЧЕ

*ε* – діелектрична проникність;

*Q* – електричний заряд

*k<sub>1</sub>* – п'єзоелектрична стала

*ξ* – коефіцієнт демпфування;

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## ВСТУП

Системою стабілізації озброєння називають комплекс приладів, технічних пристроїв і механізмів, що застосовуються на збройних платформах, зокрема і на легкій броньованій техніці, для того щоб зменшити вплив вібрацій та хитання платформи під час вогню та забезпечити більш точне попадання в ціль. Основне завдання системи стабілізації зброї полягає в компенсації відхилень від цілі, спричинених коливаннями платформи під час руху по нерівній поверхні.

Система стабілізації озброєння зазвичай включає гіроскопічні або інерційні датчики, які визначають кути нахилу і переміщення платформи, а також систему електромеханічних приводів, які компенсують ці рухи шляхом коригування положення зброї. Одним із таких чутливих елементів є акселерометр — прилад для вимірювання прискорень. Різноманіття принципів роботи та будови розширює сферу застосування акселерометрів: вони здатні виступати як прилади для вимірювання вібрацій та кута нахилу комплексу озброєння ЛБТ в тому числі.

**Метою цієї роботи** є розробка, дослідження конструкції та підвищення чутливості прецизійного чутливого елемента, зокрема – п'єзоелектричного акселерометра, що в основі містить пакетні п'єзоелементи, а також комп'ютерна симуляція зовнішніх впливів на ПА з метою оцінки отриманих характеристик.

**Актуальність цієї роботи** полягає у тому, що ведення вогню на ходу та в умовах тряски є реальним бойовим сценарієм для ЛБТ, а тому вимірювання та компенсація вібрацій та прискорень розхитувань платформи є чи не найважливішим критерієм для підвищення точності прицілювання. З огляду на це, розроблений прецизійний п'єзоелектричний акселерометр має стати більш компактним, чутливим та не менш надійним елементом системи стабілізації за наявні на сьогоднішній день технічні рішення.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

## РОЗДІЛ 1. ПРОЕКТНО-АНАЛІТИЧНИЙ

### 1.1. Огляд літературних відомостей відповідно до теми ДП

#### 1.1.1. Огляд існуючих бойових модулів та зразків ЛБТ, що використовують системи стабілізації

Станом на 2023 рік, на озброєнні збройних сил України перебуває значна кількість вітчизняних розробок у сфері легкої броньованої техніки різного призначення: бронетранспортери (БТР), бойові машини піхоти (БМП), легкі броньовані тягачі, машини медичної евакуації та допомоги, машини (установки) тилового забезпечення та інші.

Переважна більшість з них оснащена уніфікованими бойовими модулями (БМ), що передбачає можливість їх встановлення на різні колісні та гусеничні шасі. До складу бойових модулів входять збройні системи гарматного, кулеметного, гранатометного типу, протитанкові керовані ракетні комплекси (ПТРК), системи димового маскування, комплекси виявлення лазерного опромінення а також системи управління вогнем. Саме системи управління вогнем в свою чергу базуються на прицільних комплексах, котрі нерозривно взаємопов'язані із стабілізаторами озброєння (СО).

Поширеного застосування знайшли такі башти та бойові модулі для ЛБТ: «Грім», «Ингул», «Парус», «Десна», «Спис», «Шквал», «БАУ 23×2», «Штурм» «Стилет», і «Дуплет».

Нижче приведені бойові модулі, до складу яких входять системи стабілізації озброєння, адже саме вони є предметом дослідження цього проекту.

					ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

**БМ Грім** — це бойовий модуль, розроблений ХКБМ ім. Морозова, що призначений для встановлення на такі легкі бойові броньовані машини як: БТР-60/70/80, БТР-3Е, МТ-ЛБ, М-113 та БМП-2. Конструктивно, цей БМ оснащений винесеним озброєнням, що розраховане для боротьби з броньованою технікою, живою силою та вогневими точками, а також здатне уражати повільні повітряні цілі (рис. 1.1.1).

Як результат, застосування винесеного озброєння підвищило захист екіпажу, усунуло загазованість бойового відділення при стрільбі та зменшило сумарну масу БМ. За стабілізацію озброєння відповідає стабілізатор **СВУ-1000**, що працює у двох площинах.[1]



Рис 1.1.1 - БМ «Грім» на БТР-4 [1]

Таблиця 1.1 - Тактико-технічні характеристики БМ «Грім»[1]

Параметр	Характеристика
Тип:	стабілізований, дистанційно-керований з винесеним озброєнням
Маса без боєкомплекту:	1280 кг
Маса з боєкомплектом:	1800 кг
Бойовий розрахунок:	1 особа (оператор)
Габаритні розміри:	довжина: 3303 мм
	ширина: 1540 мм
Озброєння:	30-мм автоматична гармата ЗТМ-2 (2А42) (не менше 360 пострілів (у двох стрічках))
	30-мм автоматичний гранатомет АГ-17 (КБА-117) (150 пострілів (в одній стрічці))
	7.62-мм кулемет КТ-7.62 (ПКТ) (не менше 1200 пострілів)
	4 ПТРК 9П135М «Конкурс»
	8 ПУ аерозольних (димових) гранат
Прицільний комплекс:	ПНК-4С «Агат» або ПНК-5, ПЗУ-7
Кути наведення блоку озброєння:	за горизонтом 360°
	за вертикаллю від -10° до +60°
Стабілізатор озброєння:	СВУ-1000
Комплекс виявлення лазерного опромінення з системою постановки завіси і маскування об'єктів спецтехніки «Лінкей-СПЗ» (8 ПУ).	

Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ

Арк.

14

**КБА-105 «Шквал»** —це уніфікований бойовий модуль українського виробництва, розроблений КП «НТЦ АСО» що, призначений для модернізації бронетранспортерів, бойових машин піхоти та іншої легкої броньованої техніки, такої як БТР-3У і БТР-4, БМП-1У, (рис. 1.1.2), а також МТ-ЛБМШ.

КБА-105 «Шквал» оснащений:

- 30-мм гарматою ЗТМ-1 (або ЗТМ-2) із боєкомплектom в 350 снарядів;
- 7,62-мм спареним кулеметом КТ-7,62 із боєкомплектom в 2500 набоїв;
- 30-мм автоматичним гранатометом АГ-17 (29 готових до використання гранат та 87 гранат перевозиться в резерві (три магазини по 29 гранат))
- Протитанковим керованим озброєнням.
- Шістьма 81-мм установок димових/аерозольних гранат, встановлених по три штуки з кожного боку башти.

Комплекс управління вогнем складається із прицільного комплексу ОТП-20, інтегрованої СУВ керованими ракетами, і стабілізатора озброєння СВУ-500. [2]



Рис. 1.1.2. - КБА-105 «Шквал» на БМП-1УМ [3]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		15

**БМ «Спис»** — український бойовий модуль з автоматичною гарматою калібру 30 мм. Може бути встановлений на легку броньовану техніку (наприклад БТР чи БМП) та на деякі плавучі засоби.

Цей модуль озброєний:

- 30-мм гарматою типу 2А72 (ЗТМ-1 або КБА-1) на 300 снарядів;
- 30-мм автоматичний гранатомет КБА-117 (АГС-17) на 125 гранат;
- 7,62-мм кулеметом КТ-7,62;
- Комплексом керованого озброєння «Бар'єр» з двома ракетами. [4]

Модуль має тепловізорну і денну камери (оптико-телевізійний та оптико-тепловізійний модулі), лазерний далекомір, систему дубльованого управління бойовим модулем: управління може здійснюватись з двох робочих місць — оператора і командира, можливість дистанційного управління модулем «з землі». Бойовий модуль «Спис», на відміну від інших модулів, заряджається не зовні, а зсередини. За словами розробників, це суттєво підвищує бойові можливості та живучість бойової броньованої машини.

Також модуль оснащений системою управління вогнем (СУВ) «**SINTEZ**» із цифровим електромеханічним 2-площинним стабілізатором озброєння (рис. 1.1.3). [4]



Рис 1.1.3 – БМ «Спис» з СО «SINTEZ» [4]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



**БМ-3М «Штурм»** — це одномісний бойовий модуль, розроблений КБ імені Морозова під керівництвом М. Д. Борисюка. Його конструкцією передбачено стабілізацію блоку озброєння за двома площинами.

Озброєння цього модуля призначене для боротьби з броньованою технікою, живою силою та гелікоптерами. БМ-3М «Штурм» вирізняється серед інших модулів свого класу своїми невеликими габаритами (невеликий займаний внутрішній обсяг бойового відділення), і чи не найбільшою вогневою спроможністю. Даний модуль використовується на бронетранспортерах БТР-3Е із колісною формулою 8×8 (рис 1.1.4). [5]

У модулі встановлена:

- Нарізна малокаліберна автоматична 30-мм гармата ЗТМ-1 з боєкомплектом з 350 снарядів різного типу (БТ, ОБТ, ОФЗ);
- 7,62-мм кулемет КТ-7,62 на 2000 патронів;
- 30-мм автоматичний гранатомет КБА-117, що має один заряджений магазин і три магазини у резерві (по 29 гранат);
- Комплекс керованого озброєння «Бар'єр» з чотирма ракетами, які мають бронепробиття за динамічним захистом не менше 800 мм. [5]

До складу комплексу входить оптично-електронна система спостереження, прицілювання і управління вогнем (СУВ), виріб «Трек-М». Комплекс керування вогнем складається з оптико-електронного прицільного комплексу ОТП-20, інтегрованого з системою управління стрільбою ПТРК «Бар'єр» та стабілізатором озброєння **СВУ-500** у вертикальній і горизонтальній площинах, що дозволяє вести вогонь на ходу. На башті встановлені по три штуки з кожної сторони 81-мм димові або аерозольні гранати «Хмара», що приводяться в дію електроспуском. [5]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рис 1.1.4. – БМ-3М «Штурм» на БТР-3Е [6]

*БМ «Інгул»* розроблений Київським КП «Науково-технічний центр артилерійсько-стрілецького озброєння» з метою удосконалення існуючих легкоброньованих колісних і гусеничних машин. Зокрема, він може бути встановлений на БРДМ-2, БРДМ-2М, БТР-70, БТР-80 та БТР-7, а також патрульні катери з малою водотоннажністю (рис 1.1.5) [7]

Цей бойовий модуль має високу компактність та значну вогневу потужність, що дозволяє встановити його на легкі бойові машини (наприклад БРДМ-2). В якості озброєння модуля використовується автоматична гармата ЗТМ-2 (або інша гармата, наприклад 2А42, 2А72) калібру 30 мм і спарений з нею кулемет КТ-7.62 мм (ПКТ). [7]

Димове маскування забезпечує пускова система 902У «Туча», а для боротьби з важкою бронетехнікою модуль оснащений ПТРК «Бар'єр» з ракетами типу Р-2. Управління вогнем на модулі здійснюється через оптико-телевізійний прицільний комплекс ОТП-20 «Циклоп-1», що включає телевізійну камеру і лазерний далекомір, а стабілізатор СВУ-500 забезпечує високу точність стрільби під час руху. [7]



Рис 1.1.5. – БМ «Інгул» [8]

## 1.1.2 Огляд існуючих систем стабілізації озброєння

Роботи, що присвячені розробці нового бойового обладнання та модернізації існуючого є як ніколи актуальними в умовах повномасштабної війни за незалежність України. Зокрема, удосконалення існуючих систем стабілізації озброєння наразі мають знайти своє застосування. Нижче приведено огляд декількох існуючих станом на 2023 рік комплексів СО, призначених для встановлення на легку броньовану техніку.

**2Е36-І** - стабілізатор озброєння, що призначений для стабілізації та стабілізованого наведення у горизонтальній та вертикальній площинах гармати та спареного кулемета з метою забезпечення ефективної стрільби на ходу та з місця по наземним та повітряним цілям. Цей СО застосовувався у БМП-2 — радянській гусеничній бойовій машині піхоти, призначеній для перевезення бійців та їх більшої захищеності на полі бою в умовах використання супротивником зброї масового ураження. [9]

З метою забезпечення взаємозамінності розробка виконана із збереженням габаритно-приєднувальних розмірів блоків стабілізатора 2Е36-І. Застосовано сучасну перспективну елементну базу, введено поліпшення в схемні та технічні рішення.(рис. 1.1.6) [9]

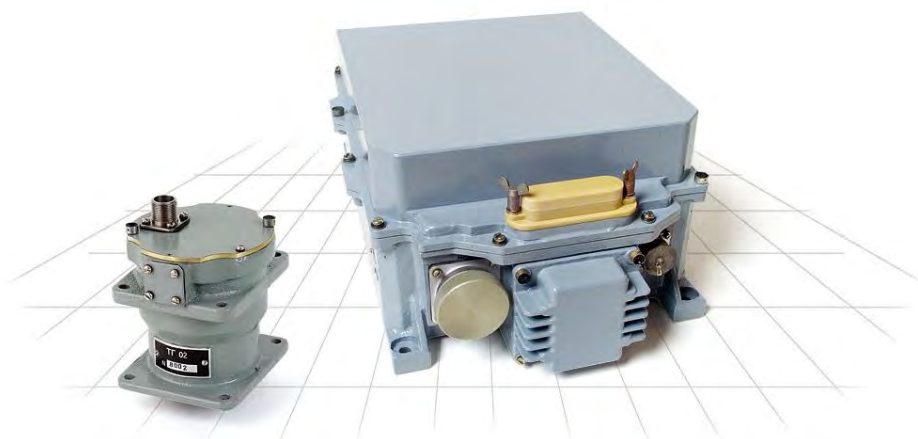


Рис. 1.1.6. - блоки СО 2Е36-І для БМП-2 [9]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

### **Комплектація стабілізатора 2Е36-І:**

- гіротахометр ГТ46 (2 шт.);
- гіротахометр ГТ46-1;
- тахометр ТГ01;
- пульт керування ПУ03 (2 шт.);
- блок управління БУ1021;
- підсилювач УУД12 (2 шт.);
- фільтр живлення ФП02;
- прилад цілевказівки ПЦУ01;
- електродвигуни ЕДМ-20М та ЕДМ-14М.

Таблиця 1.2. - тактико-технічні характеристики стабілізатора 2Е36-І. [9]

<b>Параметр</b>	<b>Характеристика</b>	
Режими роботи:	АВТ	Автоматичний режим
	НАР	Напіваавтоматичний режим
	ЦВ	Цілевказівний режим
Діапазон швидкості наведення	Max:	35 %/с
	Min:	0,07 %/с
Серединна похибка СО	≤ 1,0 т.д.	
Похибка приводу у режимі ЦВ	≤ 2,0°	
Маса	120 кг	
Термін служби	Не менше 10 років	
Середнє напрацювання на відмову	Не менше 500 годин	
Кути наведення по горизонталі	Повне кругове обертання	
Кути наведення по вертикалі	Max:	+75°
	Min:	-5°

**СВУ-500** – приладовий комплекс стабілізатора озброєння ЛБТ, що за заявою розробника, ПАТ «НВО «Київський Завод Автоматики», може застосовуватися з метою удосконалення і розробці легкоброньованих бойових машин БТР, БМП, БМД та ін. (рис. 1.1.7.) [10]

Ця система СО існує у різних варіантах виконання для різних типів ЛБТ (СВУ-500, СВУ-500-01, СВУ-500-3Ц, СВУ-500-4Ц, СВУ-500-4Ц-01, СВУ-500-10Р, СВУ-500-7Ц), вона призначена для стабілізованого наведення та супроводу наземних, повітряних та надводних цілей в обох площинях для точної стрільби з нерухомого та рухомого положення. Ці комплекси використовуються в системах управління вогнем у бойових модулях, що були приведені вище, зокрема: КБА-105 «Шквал», БМ-3М «Штурм», «Інгул», «Парус» та інших. [10]

**СВУ-500-3Ц та СВУ-500-4Ц** – модернізовані цифрові стабілізатори озброєння, що забезпечують швидке перенацілювання башти (бойового модуля) на цілі, обрані командиром. На відміну від систем СВУ-500 та 2ЕЗ6-І, у цих СО запроваджено цифрові режими роботи та управління рухом озброєння, а також перешкодостійкий цифровий інтерфейс пультів керування вогнем. [11]

Параметри СО можуть бути налаштовані з пульта керування вогнем безпосередньо оператором, а уся необхідна інформація щодо справності та режиму роботи СО у буквеному та цифровому вигляді виводиться на дисплей пульта керування. [11]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		22

За рахунок оптимізації схемно-технічних рішень та законів управління скорочено приладовий склад (виключено компенсаційний гіротахометр та окремих блок фільтрів) та зменшено масу. У них реалізовані режими встановлення на кути заряджання та приведення блоку озброєння та бойового модуля у вихідне положення.[11]

Таблиця 1.3. - Режими роботи стабілізаторів СВУ-500-3Ц та СВУ-500-4Ц. [11]

Режим роботи	Позн.	Призначення режиму роботи
Автоматичний	(АВТ)	для стрільби за наземними та надводними цілями
Напіваавтоматичний	(НАР)	для стрільби по повітряним і швидкоманевруючим наземним цілям
Керований	(КЕР)	для стрільби протитанковими керованими ракетами
Цілевказівний	(ЦВ)	для екстреного розвороту на цілі, обрані командиром
Готовність	(ГТВ)	приведення озброєння у вихідний стан під час руху вузькими трасами
Готовий	(ГТ)	технологічне відключення силового електроживлення приводів у процесі пусконаладжувальних робіт
Діагностика	(Д)	автоматична діагностика справного стану блоків стабілізаторів на фоні режимів основної роботи
Вгору-вниз	(Обв.)	обведення елементів конструкції виробів БТР, БМП, що перешкоджають повороту башти та блоку озброєнь

Таблиця 1.4 – Тактико-технічні характеристики СВУ-500-3Ц та СВУ-500-4Ц. [11]

<b>Кути наведення:</b>		
Горизонтальна площина	Повне кругове обертання	
Вертикальна площина	Max: +70°	
	Min: - 7°	
Потужність приводів наведення	500Вт	
<b>Швидкість наведення у режимах роботи:</b>		
Максимальна	НАР	$\geq 35$ °/с;
	АВТ	$\geq 6$ °/с;
	КЕР	$\geq 0,5$ °/с.
Мінімальна	НАР	$\leq 0,1$ °/с;
	АВТ	$\leq 0,07$ °/с;
	КЕР	$\leq 0,02$ °/с.
Середня похибка стабілізації	$\leq 1$ (3,6) кут. хв.	
<b>Статичні похибки в режимах роботи, т.д. (кут. хв.)</b>		
ЦВ	$\leq 15$	
ГТВ	$\leq 25$	
Неплавність наведення за умови низької швидкості	$\leq 0,3$ т.д.	
<b>Термін служби</b>		
Гарантійний	7 років	
Загальний	20 років	
<b>Маса</b>		
СВУ-500-3Ц	65 кг	
СВУ-500-4Ц	68 кг	



### **Комплектація стабілізатора СВУ-500-3Ц:**

- 2 гіротахометри (ГТ46-01 по горизонтальній площині та ГТ46 у вертикальній);
- Цифровий блок управління СУ 1022-03;
- 2 підсилювачі потужності УУД 14-02;
- 2 електродвигуни ЕДМ20М;
- Цифровий пульт управління вогнем ПУОЗ-05;
- Прилад цілевказання командира ПЦУО 1-01;
- Статичний перетворювач електроживлення СП10-01;
- 2 датчики кута ДУ04 повороту озброєння (у двох площинах);
- Кабелі міжблочних зв'язків. [11]

### **Відмінність комплектації стабілізатора СВУ-500-4Ц:**

Склад стабілізатора СВУ-500-4Ц відрізняється від стабілізатора СВУ-500-3Ц наявністю другого пульта управління вогнем для командира та відсутністю приладу ПЦУО 1-01, оскільки цілевказівний режим здійснюється від приладу панорамного огляду, що не входить до складу СВУ-500-4Ц.[11]



Рис. 1.1.7. -Модулі СО «СВУ-500» для легкої броньованої техніки [10]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

*СВУ-500-7Ц* – стабілізатор озброєння ЛБТ підвищеної точності, в котрому втілена підвищена швидкодія системи та зменшена вартість СО.

Використання коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ), у яких смуга пропускання розширена (від 100 Гц) дало можливість знизити собівартість виробництва. ПАТ «НВО «КЗА» було проведено розробку конструкторської документації, виготовлення КВГ та всебічні випробування, у тому числі, у складі сучасного стабілізатора СВУ-500-7Ц і бойової машини БТРЗЕ1. [12]

Також, підвищення швидкості обробки інформації у цифровому обчислювачі блока керування сприяло підвищенню точності СО. Відтак, швидкість обробки інформації БУ1022-07 збільшилась у 2,5 рази в порівнянні з БУ1022-04 стабілізатора СВУ-500-4Ц. Тривалість одного такту роботи обчислювача зменшилась із 2,5 мс до 1 мс. [12]

Окрім того, зменшення індуктивності дроселів в LC-фільтрах підсилювачів потужності зі збереженням припустимого рівня пульсацій, створюваних силовими мостовими комутаторами, що працюють у режимі ШИМ на активно-індуктивне навантаження обмоток якорів електродвигунів призвело до зменшення постійної часу підсилювачів потужності з 8 до 0,3 мс. [12]

Прискореним протіканням перехідних процесів СВУ-500-7Ц завдячує застосуванню нових електродвигунів ЕДМ03, що мають менші сталі часу та більші пускові струми. Як результат, швидкість спрацювання СО в умовах парирування збуджуючих динамічних моментів збільшилася, тобто під час руху машини по нерівностям і під час стрільби. [12]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Тактико-технічні характеристики покращеної моделі приладового комплексу СВУ-500-7Ц приведено у таблиці 1.5, порівняно з СВУ-500-4Ц.

Таблиця 1.5 – порівняння тактико-технічних характеристик СВУ-500-7Ц та СВУ-500-4Ц. [12]

Параметри	СВУ-500-7Ц	СВУ-500-4Ц
Максимальні кутові швидкості наведення у напівавтоматичному режимі (НАР):	$\geq 40^\circ/\text{с}$	$\geq 35^\circ/\text{с}$
Мінімальні кутові швидкості наведення в режимі керування (КЕР):	$\leq 0,01^\circ/\text{с}$	$\leq 0,02^\circ/\text{с}$
Серединна похибка СО за умови руху по трасі зі швидкістю 25 км/год	$\leq 0,5$ т. д.	$\leq 1$ т. д.
Динамічна похибка при відпрацьовуванні синусоїдального сигналу $A_0=2,5^\circ \sin t$ при частоті 0,8 Гц	$\leq 2$ т. д.	Вимога відсутня
Неплавність наведення в режимах АВТ і КЕР	$\leq 0,3$ т. д.	$\leq 0,8$ т. д.
Швидкості в режимі автоматичного супроводження цілей за сигналами системи керування вогнем	Мах: $35^\circ/\text{с}$	Режим відсутній
	Мін: $0,07^\circ/\text{с}$	
Гарантійне напрацювання	5000 годин	500 годин

Змін	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

*ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ*

Арк.

27

**СУВ «SINTEZ»** - це комплекс програмно-апаратних засобів, призначений для стабілізації озброєння, управління вогнем та спостереження з використанням оптико-електронних приладів. Можлива інтеграція на бойові модулі оснащені будь-яким озброєнням для легкої броньованої техніки. Висока витривалість і відмовостійкість в умовах критичних температур, в сухому кліматі і при підвищеній вологості. [13]

**Комплектація СУВ «SINTEZ»:**

- Пульт керування з датчиками на основі ефекту Холла, ергономічними органами управління у пило-водозахищеному виконанні;
- Сенсорний дисплей із вбудованим обігрівом матриці;
- Блок керування, що поєднує у собі два драйвери керування електродвигуном, сам модуль керування, модуль озброєння та модуль комутації відеосигналу;
- Стабілізатор озброєння, що складається з двох двигунів з датчиками зворотнього зв'язку, чутливого елемента положення зброї у просторі та чутливого елемента положення башти в просторі. (рис 1.1.8). [13]

Блок дистанційного керування забезпечує можливість віддаленого управління озброєнням комплексу з використанням системи широкосмугового доступу та кодованого сигналу Повністю дублює функціонал блоків управління, розташованих всередині бронетехніки (місце оператора місце командира). [13]

Розробником приведеної вище системи є ТОВ «Універсальні інформаційні технології» UNIT.

					<i>ДПБ.ІІМ-91.15.1760.001.ІІЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Таблиця 1.6. - Тактико-технічні характеристики СУВ «SINTEZ». [13]

Параметр	Характеристика	
Тип системи стабілізації блоку озброєння	2х осьова або 3х осьова платформа	
Швидкість повороту башти	Min:	0,01 град/сек
	Max:	50 град/сек
Швидкість руху гармати по вертикалі	Min:	0,01 град/сек
	Max:	35 град/сек
Режими наведення зброї	Напівавтомат, автоматичний, наведення ПТУР	
Автоматичне розпізнавання цілей	До 5 цілей	
Автосупровід цілей	Забезпечується 0,058 мрад/сек	
Робочі температури	-40° +60°	
Автоматична діагностика справності стану блоків системи	Забезпечується	
Швидкість руху для прицільної стрільби	Не більше 40 км/год	

Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ

Арк.

29



Рис 1.1.8 - Складові системи управління вогнем «SINTEZ»:

*а* – пульт керування; *б* – дисплей; *в* – блок керування; *г* – елементи СО. [13]

### Висновки до розділу 1.1

Спільною рисою більшості розглянутих БМ є придатність кожної з моделей до встановлення на різні типи легкої колісної на гусеничній бронетехніки. На підставі приведеної вище аналітичної оцінки тактико-технічних характеристик існуючих вітчизняних бойових модулів можна прийти до висновку, що найважливішими властивостями для БМ є насамперед компактність, швидкодія та уніфікованість систем стабілізації озброєння.

Огляд існуючих вітчизняних систем стабілізації озброєння свідчить про потребу у підвищенні точності СО, плавності наведення та швидкодії, а також зниженню похибок стабілізації озброєння. З огляду на це, напрямком дослідження обрано розробка та запровадження пристрою для вимірювання прискорень (та вібрацій) широкого частотного діапазону, а саме – п'єзоелектричного акселерометра, з метою підвищення точності системи стабілізації озброєння.

## 1.2 Опис принципу роботи п'єзоелектричного акселерометра

### 1.2.1 П'єзоелектричний ефект

Первинними перетворювачами у п'єзоелектричних приладах виступають кристали деяких діелектриків, яким притаманні п'єзоелектричні властивості.

Для того щоб отримати необхідний вихідний електричний сигнал, досліджуваний чутливий елемент використовує п'єзоелектричний ефект. «П'єзо» — грецький термін, що означає «стискати». Він полягає у тому, що електричний заряд накопичується на протилежних поверхнях п'єзоелемента під впливом зовнішньої сили стиску, зсуву чи розтягнення. Цей заряд є пропорційним до прикладеної сили. Знак заряду залежить від виду деформації, а отже він змінюється на протилежний при переході від розтягу до стиску та навпаки.

Рисунок 1.2.1. ілюструє зміщення електричного заряду внаслідок відхилення решітки в природному п'єзоелектричному кристалі кварцу. Більші кружечки представляють атоми кремнію, а менші — кисень. Кристалічний кварц, у своїй природній або повторно обробленій формі, є одним із найбільш чутливих і стабільних доступних п'єзоелектричних матеріалів.[14]

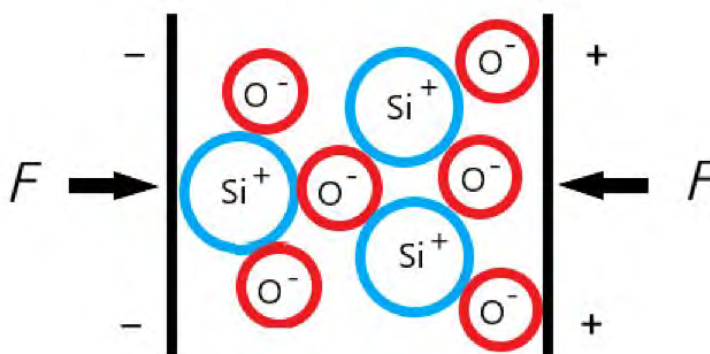


Рис. 1.2.1 – П'єзоелектричний ефект [14]

Якщо розглянути кристал кварцу, то можна виокремити три осі чутливості у матеріалі: рис (1.2.2)

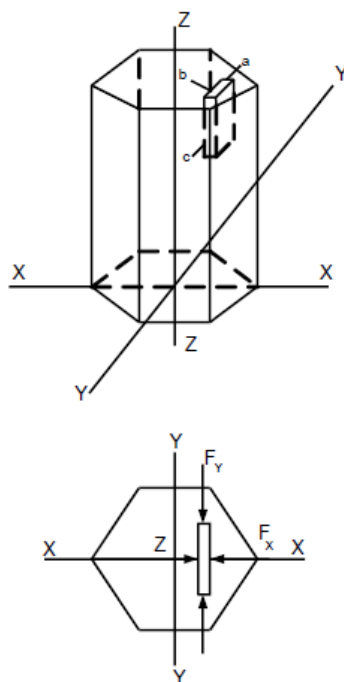


Рис. 1.2.2 – Осі чутливості в матеріалі [15]

Вертикально на цьому малюнку зображено вісь  $Z$ , її називають оптичною. Вісь  $X$ , що проходить перпендикулярно до оптичної осі зветься електричною, а вісь  $Y$ , перпендикулярну до двох попередніх – механічною.

Якщо з кристала п'єзоелектричного матеріалу вирізати пластину так, як показано на рис. 1.2.2, тобто так, щоб осі чутливості проходили перпендикулярно до її граней, тоді під дією сил  $F_x$  і  $F_y$ , що напрямлені перпендикулярно до оптичної осі, пластина накопичуватиме заряд на площинах, перпендикулярних до електричної осі.

Явище електризації під дією сили  $F_x$  має назву поздовжнього п'єзоефекту і використовується при побудові п'єзоелектричних приладів.

Явище електризації під дією сили  $F_y$ , має назву поперечного п'єзоефекту, і його застосовують у розробці приладів для вимірювання прискорень, сил та змінних тисків.[15]



Сили, прикладені до п'єзопластини вздовж оптичної осі, не спричиняють появу заряд.

Величину заряду, що виникає на площинах п'єзопластини за умови прикладення рівномірної сили, що стискає чи розтягує пластину, визначається за формулами 1.1 та 1.2. [15]

Сила  $F_x$ , що направлена вздовж електричної осі:

$$Q = k_1 \cdot F_x ; \quad (1.1)$$

Сила  $F_y$ , що направлена вздовж механічної осі:

$$Q = k_1 \cdot \frac{S_x}{S_y} \cdot F_y ; \quad (1.2)$$

де  $Q$  – електричний заряд, Кл;

$F_x$  та  $F_y$  – сили, що діють перпендикулярно до оптичної осі пластини, Н;

$S_x$  та  $S_y$  – площі поверхонь, перпендикулярних до відповідних осей;

$k_1$  – п'єзоелектрична стала.

Із рівняння (1.2) слідує, що величини зарядів, які виникають на гранях  $bc$  під дією сили  $F_x$ , не залежать від геометричних розмірів пластини.

Попри те, під дією сили  $F_y$  заряди також виникають на гранях  $bc$ , проте їх величина згідно з рівнянням (1.2) залежить від геометричних розмірів пластини. Таке явище можливо використати для підвищення чутливості п'єзоелектричного перетворювача. Для цього необхідно збільшити співвідношення площі поверхонь  $S_x/S_y$ . [15]

Наочним прикладом використання вищезгаданого явища, є побудова пакетного п'єзоелемента. Для цього використовують відразу кілька пластин, які послідовно навантажують однією й тією ж самою силою (рис 1.2.3). В пакетному п'єзоелементі всі грані з позитивними і негативними зарядами з'єднані провідниками, а отже загальний заряд такого п'єзопакета дорівнює сумі зарядів усіх пластин. [15]

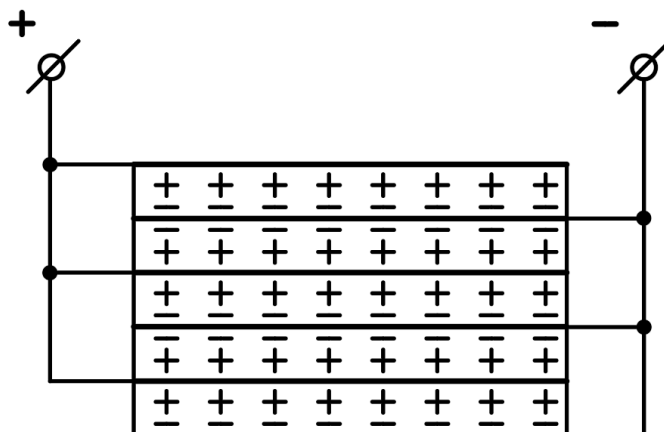


Рис. 1.2.3. Схема пакетного п'єзоелемента [15]

Однією з переваг пакетів з п'єзопластин є те, що вони мають більшу міцність, ніж окремі п'єзоелементи.

Недоліком же можна вважати їх нижчу частоту коливань.

Власна частота однієї пластини визначається за формулою 1.3:

$$f = \frac{k_2}{d}; \quad (1.3)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт пропорційності;

$d$  – товщина п'єзопластини, мм.

Виготовляється пакетний п'єзоелемент так: грані пластин, з яких знімається заряд, металізують колоїдним сріблом і склеюють, використовуючи це металізоване покриття. [15]

## 1.2.2 Огляд відомих п'єзоелектричних матеріалів

*П'єзоелектричні матеріали (ПМ)* - це діелектрики (напівпровідники), що мають добре виражені п'єзоелектричні властивості. П'єзоелектричні кристали поширені у природі як вигляді природних мінералів (кварц, турмалін, цинкова обманка та інші), більшість практично важливих ПМ синтезують (сегнетова сіль, ніобат літію, п'єзокераміка, п'єзополімери). [15]

З них, сегнетова сіль є найчутливішою, але її п'єзоелектричні властивості залежать від температури, а при температурі 38°C майже зникають.

ПМ використовуються для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів різного призначення: в гідролокації, ультразвуковій техніці, акустичній електроніці, точній механіці, тощо. [16]

Для побудови точних вимірювальних пристроїв використовують пластинки з кварцу, що пояснюється його високою механічною та електричною міцністю. П'єзоелектричні властивості кварцу меншою мірою залежать від температури і не змінюються навіть при температурі до 250...300°C. Важлива перевага кварцу – лінійність його характеристик при навантаженні аж до зруйнування. [16]

Для виготовлення п'єзоелемента вибирають ПМ, зіставляючи їх параметри і характеристики, які визначають ефективність і стабільність роботи п'єзоелектричного перетворювача (ПП) з урахуванням його призначення та умов експлуатації. ПМ характеризуються наступними табличними величинами:

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

- Коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $K_p$
- П'єзомодулем  $d$ ,
- Відносна діелектрична проникність  $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ ,
- Коефіцієнтом пружної податливості  $S^E$ ,
- Тангенсом кута діелектричних втрат  $\tan \delta$ ,
- Механічною добротністю  $Q_m$ ,
- Густиною  $\rho$ ,
- Гранично допустимою температурою  $T_k$  (температура Кюрі для сегнетоелектриків).
- Модуль Юнга  $E$ . [16]

**Коефіцієнт електромеханічного зв'язку** ( $K_{зв}$ ) – це коефіцієнт, квадрат якого визначає, яка частина підведеної до ПЕ електроенергії ( $W_{під}$ ) перетвориться в енергію іншого виду ( $W_{перетв}$ ):

$$K_{зв}^2 = \frac{W_{перетв}}{W_{під}} \quad (1.4)$$

За прямого п'єзоэффекту підведена до кристала механічна енергія витрачається не тільки на пружну деформацію, приводячи не лише до накопичення пружної енергії  $W_{пруж}$ , але й до створення електричної поляризації, що обумовлює накопичення електричної енергії  $W_{ел}$ :

$$K_{зв}^2 = \frac{W_{ел}}{W_{під}} = \frac{W_{ел}}{W_{пруж} + W_{ел}} \quad (1.5)$$

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку поєднує у собі співвідношення різних діелектричних та пружних параметрів, що визначають застосування п'єзоелектриків у практичних цілях. Цю властивість використовують для порівняння різних ПМ між собою.[16]

**Тангенс кута діелектричних втрат** – це важливий електрофізичний параметр діелектрика, який характеризує діелектричні втрати, що супроводжують перетворення частини електроенергії в тепло. Величина цих втрат залежить від температури і частоти. Вони свідчать про особливості механізму поляризації ПМ. Величина діелектричних втрат характеризується тангенсом кута втрат  $\tan \delta$ , але описати залежність діелектричних втрат від частоти зручніше комплексною діелектричною проникністю  $\varepsilon^*(\omega)$ :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega);$$

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon', \quad (1.6)$$

де  $\varepsilon' = \varepsilon$ ;  $\varepsilon''$  – коефіцієнт втрат.

Обидві ці величини є не менш важливими, ніж відповідні залежності діелектричної проникності, залежності діелектричних втрат від температури, частоти електричного поля, тощо. Важливо зазначити, що  $\tan \delta$  має фізичний зміст лише для змінного синусоїдного електричного поля. [16]

**Модуль Юнга ( $E$ )** описує властивість об'єкта деформуватися вздовж осі за умови дії сили вздовж цієї осі, тобто здатність матеріалу до опору при розтягуванні чи стисненні під час пружної деформації, і визначається відношенням напруги до подовження.

Для кристалів кубічної форми,  $E$  дорівнює кожній з трьох перших діагональних компонент пружної жорсткості.

Модуль Юнга можна також назвати називають модулем пружності, оскільки він характеризує здатність чинити опір деформації. [16]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

**П'єзомодуль  $d_{ij}$**  у динамічному режимі визначається за формулою 1.5 :

$$d_{ij} = \frac{2 \cdot 0,19 \cdot 10^{-5} K_p}{D \omega_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0}}, \quad (1.7)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

$d = D$  – діаметр ПЕ;

$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникливість. [15]

**Температура Кюрі.** Важливою характеристикою п'єзоелектричного матеріалу є його температура Кюрі. За наближення температури п'єзоелемента до температури Кюрі його п'єзоелектричні властивості слабшають і зникають за цієї температури. Отже, температура Кюрі визначає максимальну робочу температуру перетворювача. [16]

З огляду на відмінні характеристики різних за походженням ПМ, розрізняють сигнетом'які (високочутливі, але вразливі до зміни температури та вібрації), сигнетожорсткі (чутливі до сторонніх електричних полів), частотно-селективні (володіють високою температурною та часовою стабільністю) та високотемпературні групи матеріалів. [16]

Нижче, у таблицях 1.7 - 1.11 приведені значення характеристик п'єзоматеріалів, що виготовляються та обробляються підприємствами «Oltano» та «Piezoceram». [18] [19]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Таблиця 1.7 - основні табличні характеристики найпоширеніших ПМ [15]

Характеристика	Позначення та розмірність	Кварц	Турмалін	Ніобат літію	Дигідрофосфат амонію	Сульфат літію	Сегнетова сіль	ТБ-1	ТБК-3
Тангенс кута діелектричних втрат	$\tan \delta, 10^{-2}$	0.5	1.0	-	1.0	1.0	5	2-3	3-4
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_p$	0.095	0.1	0.32	0.28	0.37	0.67	0.40	0.46
П'єзоелектричний модуль	$d_{ij}, 10^{-12}$ Кл/Н	2.31	1.90	16.2	24	16	27	45	45
Механічна добротність	$Q_m$	$10^4$	$10^2$	$10^5$	$10^2$	$10^2$	-	400	450
Температура точки Кюрі	$T_k, ^\circ\text{C}$	550	-	1142	125	75	45	120	105
Густина	$\rho, 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	2.65	3.10	4.64	1.80	2.05	1.77	5.30	5.40
Відносна діел. проникність	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	3.5-4.5	6.60	28.6	15.3	10.3	250	1500	1180
Модуль Юнга	$E, 10^9$ Н/м <sup>2</sup>	80	160	95	19.3	46	19.3	100	120

Таблиця 1.8 - характеристики ПМ виробника «Oltao» [18]

Характеристика	Позначення	Розмірність	PCM-19	PCM-19M	PCM-59	PCM-42	PCM-44
			ЦТС-19	ЦТС-19M	ЦТС <sub>T</sub> BC-1	ЦТС-24	ЦТС-24M
Тангенс кута діелектричних втрат	$\tan \delta$	$10^{-2}$	0,035	0,025	0,027	0,0075	0,0075
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_{31}$	1	0,56	0,62	0,65	0,50	0,52
	$K_{33}$	1	0,29	0,35	0,38	0,30	0,30
	$K_p$	1	0,64	0,72	0,73	0,60	0,62
П'єзоелектричний модуль	$d_{31}$	$10^{-12}$	175	183	289	100	100
	$d_{33}$	Кл/Н	360	410	600	340	255
	$g_{31}$	$10^{-3}$	8,9	10,9	8,0	10,7	11,9
	$g_{31}$	В*м/Н	22,3	24,4	17,1	26,7	26,8
Частотна стала	$N_p$	Гц*м	2,0	2,0	2,0	2,3	2,2
Швидкість звуку	$V^I_E$	$10^3$ м/с	2,95	3,00	2,75	3,23	3,55
Пружня жорсткість	$S^E_{11}$	$10^{-12}$	15,8	16,3	16,0	11,2	11,5
	$S^E_{33}$	м <sup>2</sup> /Н	16,8	17,5	18,5	15,1	15,4
Коефіцієнт Пуансона	$\sigma$	1	0,38	0,36	0,38	0,30	0,31
Гранична механічна міцність при статичному розтягу/стиску, не менше:	$\sigma_{роз.}$	$10^6$	-	-	19,6	18,6	-
	$\sigma_{стис.}$	Н/м <sup>2</sup>	294	294	400	343	-
Механічна добротність	$Q_m$	1	90	90	50	500	200
Температура точки Кюрі	$T_k$	°С	290	300	170	270	280
Густина	$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,60	7,60	7,55	7,40	7,55
Відносна діел. проникність	$\epsilon^T_{33}/\epsilon_0$	1	1,75	-	-	0,95	-
Модуль Юнга	$E$	$10^{11}$ Н/м <sup>2</sup>	0,70	-	-	-	-

Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ

Арк.

40



Таблиця 1.9 - характеристики ПМ виробника «Oltano» [18]

Характеристика	Позначення	Розмірність	PCM	PCM	PCM	PCM	PCM
			-40M	-80M	-65	-75	-20
			ЦТС	-	ЦТБ	ЦТС	ЦТС
			Ст-3		С-3	НВ-1	-35
Тангенс кута діелектричних втрат	$\tan \delta$	$10^{-2}$	0,008	0,005	0,012	0,022	0,02
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_{31}$	1	0,53	0,54	0,52	0,59	0,45
	$K_{33}$	1	0,31	0,32	0,30	0,34	0,28
	$K_p$	1	0,67	0,70	0,64	0,67	0,64
П'єзоелектричний модуль	$d_{31}$	$10^{-12}$ Кл/Н	122	120	158	200	80
	$d_{33}$		290	300	360	425	200
	$g_{31}$	$10^{-3}$ В*м/Н	9,1	10,7	7,7	8,2	9,0
	$g_{31}$		23,4	26,1	16,8	19,4	22,6
Частотна стала	$N_p$	Гц*м	2,2	2,2	2,4	2,0	2,5
Швидкість звуку	$V^I_E$	$10^3$ м/с	3,24	3,22	3,47	2,92	3,50
Пружня жорсткість	$S^E_{11}$	$10^{-12}$ м <sup>2</sup> /Н	12,6	12,8	11,1	15,3	10,5
	$S^E_{33}$		15,5	14,8	13,9	16,5	13,5
Коефіцієнт Пуансона	$\sigma$	1	0,31	0,30	0,30	0,34	0,30
Гранична механічна міцність при статичному розтягу/стиску, не менше:	$\sigma_{роз.}$	$10^6$ Н/м <sup>2</sup>	19,6	-	21,6	-	-
	$\sigma_{стис.}$		400	-	392	-	-
Механічна добротність	$Q_m$	1	800	1300	200	57	600
Температура точки Кюрі	$T_k$	°С	280	320	180	240	300
Густина	$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,40	7,40	7,20	7,30	7,40
Відносна діел. проникність	$\epsilon^T_{33}/\epsilon_0$	1	-	-	-	-	0,8
Модуль Юнга	$E$	$10^{11}$ Н/м <sup>2</sup>	-	-	-	-	-

Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ

Арк.

41

Таблиця 1.10 - характеристики ПМ виробника «Oltano» [18]

Характеристика	Позначення	Розмірність	PCM-10	PCM-83	PZT-4	PZT-5H
			ЦТС-22	ЦТС-83Г		
Тангенс кута діелектричних втрат	$\tan \delta$	$10^{-2}$	0,025	0,018	0,004	0,02
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_{31}$	1	0,33	0,58	0,58	0,44
	$K_{33}$	1	0,17	-	-	0,75
	$K_p$	1	0,42	-	-	0,75
П'єзoeлектричний модуль	$d_{31}$	$10^{-12}$	46	1,43	1,23	2,74
	$d_{33}$	Кл/Н	102	-	-	5,93
	$g_{31}$	$10^{-3}$	7,6	-	10,7	11,4
	$g_{31}$	В*м/Н	19,6	-	-	24,8
Частотна стала	$N_p$	Гц*м	2,6	-	-	19
Швидкість звуку	$V^I_E$	$10^3$ м/с	3,80	-	3,22	2,8
Пружня жорсткість	$S^E_{11}$	$10^{-12}$	10,0	-	-	16,6
	$S^E_{33}$	м <sup>2</sup> /Н	11,5	-	-	21,0
Коефіцієнт Пуансона	$\sigma$	1	0,31	-	-	0,36
Механічна добротність	$Q_m$	1	750	-	500	32
Температура точки Кюрі	$T_k$	°С	320	-	328	225
Густина	$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,40	-	-	7,87
Відносна діел. проникність	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	1	0,8	-	-	3,2
Модуль Юнга	$E$	$10^{11}$ Н/м <sup>2</sup>	0,92	-	-	56

Таблиця 1.11 - характеристики ПМ виробника «Piezoceram» [19]

			Підвищеної напруги			Високочутливі		
Характеристика	Позн.	Розмір-ність	PCM -40	PCM -41	PCM -80	PCM -50	PCM -51	PCM -55
Тангенс кута діел. втрат	$\tan \delta$	$10^{-4}$	40	40	20	180	190	220
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	$K_{31}$	1	0,32	0.34	0.30	0.36	0.37	0.39
	$K_{33}$	1	0,67	0.68	0.64	0.72	0.74	0.70
	$K_p$	1	0,56	0.58	0.51	0.64	0.64	0.62
П'єзоелектричний модуль	$d_{31}$	$10^{-12}$ Кл/Н	125	135	95	180	180	325
	$d_{33}$		290	315	225	385	405	630
	$g_{31}$	$10^{-3}$ В*м/Н	11.3	10.9	10.7	12.0	9.7	7.5
	$g_{31}$		26.2	25.4	25.4	25.6	21.9	14.5
Пружня жорсткість	$S_{11}^E$	$10^{-12}$	13.4	14.1	11.5	16.6	16.2	15.8
	$S_{33}^E$	$m^2/H$	17.0	17.9	13.5	19.1	18.7	18.7
Механічна добротність	$Q_m$	1	500	1400	1000	80	80	70
Температура точки Кюрі	$T_k$	°C	325	290	315	360	340	170
Густина	$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7.65	7.85	7.60	7.65	7.70	8.0
Відносна діел. проникність	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1	1.25	1.4	1.0	1.7	1.85	4.9

### 1.2.3 Застосування п'єзоелектричного ефекту у п'єзоелектричних акселерометрах

Оскільки величина електричного заряду, що виникає внаслідок п'єзоелектричного ефекту є пропорційною до прикладеної сили, тоді це явище можна використати при побудові п'єзоелектричного акселерометра, пов'язавши його із законом руху Ньютона (формула 1.5):

$$F = m \cdot a \quad (1.5)$$

У п'єзоакселерометрі, що схематично зображено на рис. 1.2.2, інерційна маса 2 тисне на чутливий п'єзоелемент 3 під дією сили прискорення, прикладеної до корпусу акселерометра 1. Електричний заряд, що виникає внаслідок цього, передаються на відповідний віддалений приймач сигналу, котрий його обробляє, а отже сигнал можливо у подальшому проаналізувати та використати для керування системою СО.

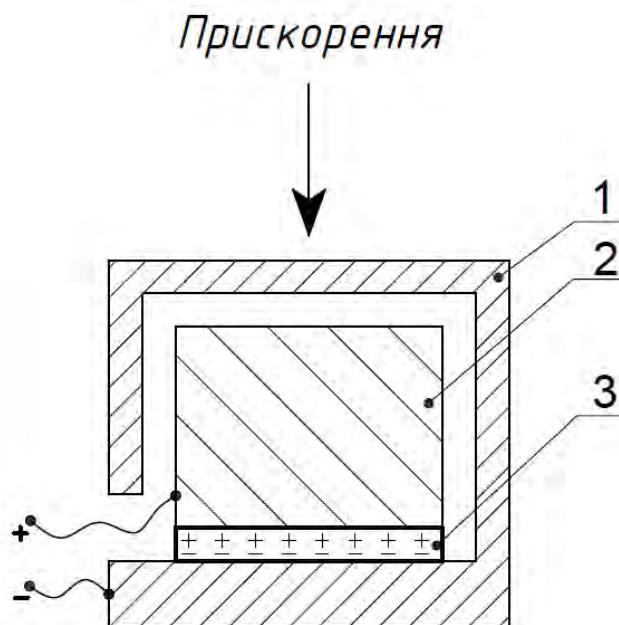


Рис. 1.2.2. – Принципова схема роботи п'єзоакселерометра;

1 – корпус; 2 – інерційна маса; 3 – чутливий п'єзоелемент.

## 1.2.4 Опис існуючих конструкцій п'єзоелектричних акселерометрів

Акселерометри, чутливим елементом котрих є п'єзоелемент, можуть мати різноманітну будову, залежно від принципу впливу на чутливий елемент. Станом на сьогодні існують 3 основні типи конструкції п'єзоакселерометра: «Зсув», «Стиснення» та «Згин».

### Конструкція типу «Зсув»

Найпопулярнішим типом конструкції є «Зсув» (рис. 1.2.4). Під дією прискорення, інерційна маса створює напругу зсуву, що передається на п'єзоелемент. Завдяки цьому, переміщення зсуву не велике, що зменшує масове навантаження на п'єзоелемент. Перевагою цієї конструкції полягає у зменшеній чутливості до температури та сприйнятливості до деформації основи, оскільки п'єзопластини ізолювані від основи. До недоліків конструкції можна віднести відносно низьке співвідношення чутливості до маси, що передбачає використання підсилювача заряду.[20]

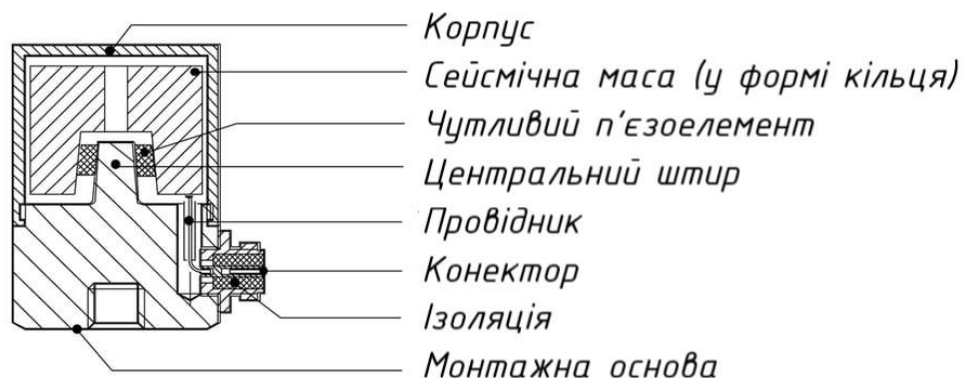


Рис. 1.2.4 - Конструкція типу «Зсув» [20]

					ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ	Арк.
Змін	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		45

## Конструкція типу «Стиснення»

Цей тип конструкції характеризується тим, що у момент стиснення п'єзоелемент знаходиться рівно на одній лінії з основою та сейсмічної масою над нею (рис. 1.2.5).

Завдяки цьому здобувається доволі високе відношення чутливості до маси, а високі резонансні частоти дозволяють отримати широкий діапазон частотної характеристики. Проте, така конструкція призводить до виникнення небажаного ефекту пружинно-масової системи між п'єзоелектричним елементом і основою. Це може призвести до отримання помилкових результатів через вигин основи або теплове розширення в разі встановлення акселерометра даного типу на тонкі листові поверхні.

Через цю особливість, конструкція типу «Стиснення» рідко використовується, за винятком вимірювань прискорень сильних ударів через її міцність. [20]



Рис. 1.2.5 - Конструкція типу «Стиснення» [20]

					ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

## Конструкція типу «Згин»

Найпростішою для втілення конструкцією акселерометра з п'єзоелектричним елементом є конструкція типу «Згин». У ній ЧЕ діє як консольний промінь з наконечником (рис. 1.2.6).

Однозначною перевагою цієї конструкції є те, що вона забезпечує найкраще співвідношення чутливості до маси. Воно настільки високе, що цей тип акселерометра не потребує живлення, а навіть може його забезпечити.

Водночас із тим, ця конфігурація також демонструє найвищу температурну чутливість, є відносно крихкою і зазвичай має нижчу резонансну частоту і, отже, нижчу смугу пропускання.

Таким чином, вони рідко використовуються зараз для точних вимірювань, але вони забезпечують велику перевагу як безживний датчик для активації основної системи вимірювання. [20]

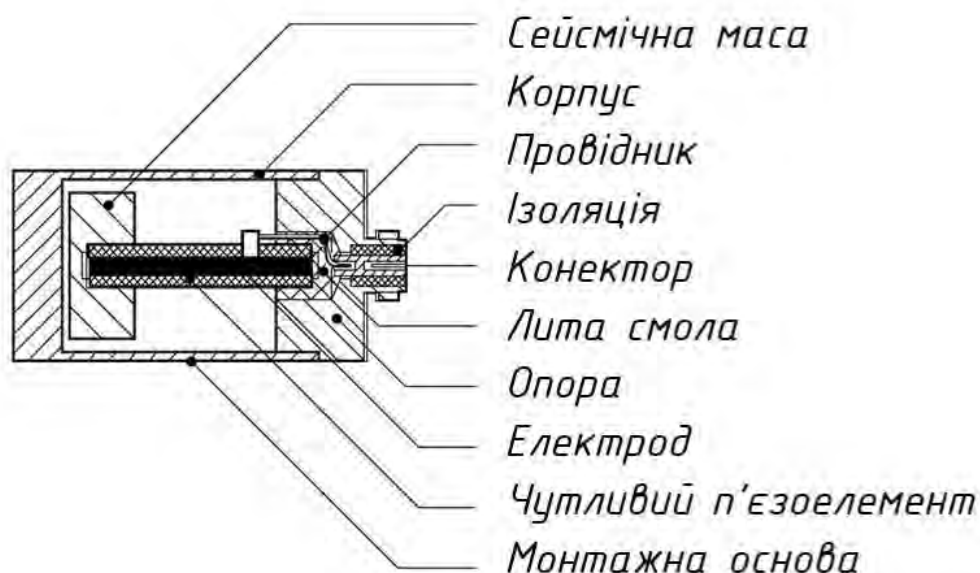


Рис. 1.2.6 - Конструкція типу «Згин» [20]

					ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## Інтегрована п'єзоелектрична електроніка (ІЕРЕ)

Більшість п'єзоелектричних акселерометрів мають інтегровану електронну схему (Integrated Electronics Piezo-Electric) для перетворення високоімпедансного вихідного сигналу (висока напруга, низький струм) п'єзоелектрика в сигнал напруги з низьким опором (низька напруга, високий струм). Зараз це звичайне явище, і більшість п'єзоелектричних акселерометрів матимуть вбудовану електроніку.

До переваг інтегрованої п'єзоелектричної електроніки відноситься:

- Фіксована чутливість незалежно від довжини та якості кабелю;
- Не потребує дорогих перетворювачів сигналу;
- Вони дорожчі, але з меншими потребами в кабелях і електроніці – загальна вартість системи вимірювальної установки на основі акселерометра ІЕРЕ менша.

Але існують випадки, де інтегровані електронні п'єзоелектричні (ІЕРЕ) акселерометри не є ідеальним рішенням, і вихідний сигнал у режимі заряджання є кращим:

- Висока температура застосування (ІЕРЕ зазвичай обмежується 121°C);
- Не вимагає постійного струму збудження (або будь-якого джерела живлення);
- Забезпечує найвищу роздільну здатність, але для запобігання шуму потрібен спеціальний кабель. [20]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



## 1.2.5 Опис поширених методів монтажу п'єзоелектричних акселерометрів

Метод монтажу п'єзоакселерометра до поверхні досліджуваного об'єкта грає суттєву роль, оскільки він на пряму впливає на характеристики вихідного сигналу, що знімається з цього чутливого елемента.

До найпоширеніших методів монтажу відносять: (рис. 1.2.7.)

- Магнітний;
- Адгезивний (клеювий);
- Болтовий/шпильковий;
- Триосьовий куб;
- Пробник.

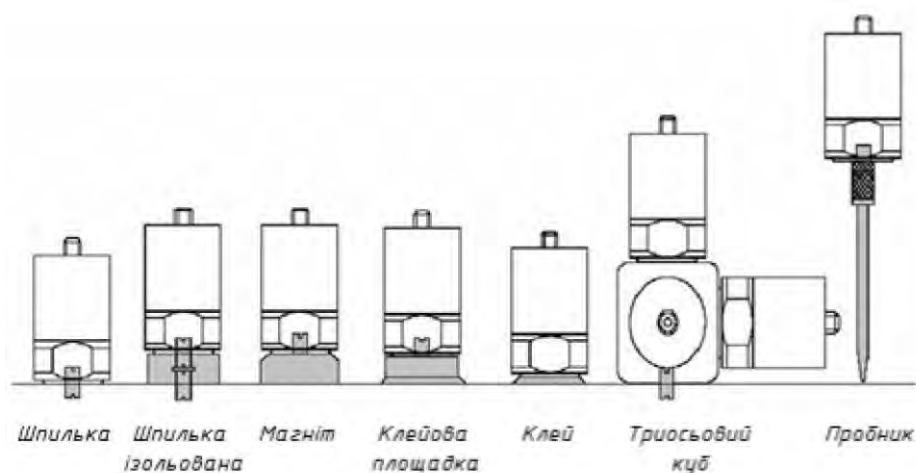


Рис. 1.2.7 – Методи монтажу ПА

Оскільки кріплення типу «пробник» передбачене для тимчасового встановлення у сипучі маси, а триосьовий куб передбачає встановлення одразу трьох акселерометрів, що мають по одній осі чутливості, то розгляд цих типів не доцільний. [21]

## Магнітний монтаж

Монтаж акселерометра за допомогою магніту є радше тимчасовим рішенням, оскільки його використання значно впливає на діапазон робочих частот ПА. Такий тип монтажу здебільшого використовують за потреби частого знімання ЧЕ, або на нерівних магнітних поверхнях, таких як корпуси, металеві труби та інше. Якщо поверхня вимірюваного об'єкту не може бути примагнічена, то до неї приклеюють магнітний майданчик. Таким чином повторні виміри можна проводити на одному й тому самому місці, але якість вимірювання буде ще гіршою. [21]

## Адгезивний (клеювий) монтаж

В окремих випадках, коли роз'ємне кріплення не передбачене конструкцією ЧЕ чи не є практичним з тих чи інших причин, використовують клейове сполучення деталей. Клеїти можна на миттєві клеї, гарячі клеї, двокомпонентні епоксидні суміші і таке інше. Вони забезпечують нероз'ємне кріплення, а тому клеїти бажано до підготовленої рівної і часто знежиреної поверхні. Такий монтаж також забезпечує електричну ізоляцію, що позитивно впливає на проблеми електричного шуму, однак не всі клейкі суміші забезпечують необхідну жорсткість та роботу у необхідних температурних діапазонах. Це також може впливати на частотну характеристику ЧЕ. [21]

					<i>ДПБ.ІІМ-91.15.1760.001.ІІЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## Гвинтовий та шпильковий монтаж

Різьбові роз'ємні з'єднання є найбільш якісним та надійним методом монтажу. Вони забезпечують надійне, міцне кріплення ПА на довгий час, що можливо за потреби розібрати. Вибір між гвинтовим та шпильковим з'єднанням обумовлюється конструктивно: у разі монтажу ПА до тонкого листового матеріалу – більше підходить гвинтовий монтаж, а якщо свердлити наскрізний отвір у випробуваному об'єкті неможливо, то обирається шпилькове з'єднання. Для досягнення більш точного вимірювання на високих частотах, необхідно переконатися, що металеві задирки або інші часточки не перешкоджають сполученню поверхонь. Нанесення тонкого шару силіконового мастила між ПА та об'єктом дослідження також сприяє передачі високих частот. Попередньо, монтажну поверхню та поверхню самого акселерометра механічно обробляють для забезпечення кращого прилягання, а також контактні і різьбові поверхні бажано змастити для запобігання прикіпанню та корозії. Прискорення переноситься з поверхні досліджуваного об'єкту на основу акселерометра, тому будь-які перешкоди між контактними поверхнями погіршують точність вимірювання.

До зазначеного вище слід додати, що діапазон робочих частот ПА зазвичай забезпечують за допомогою належного з'єднання. Безпосередній контакт добре прилягаючих одне до одної поверхонь дає найвищу резонансну частоту, що розширює діапазон робочих частот. Використання додаткового адгезивного або магнітного шару між ними знижує резонансну частоту системи, а застосування проставочних прошарків із гуми чи пластику може виступати в якості фільтру частот, ізолюючи та поглинаючи високочастотні коливання. На рис. 1.2.8 показано приблизні частотні діапазони різних методів кріплення, включаючи кріплення на шпильках, клейкі кріплення, кріплення на магнітах і тривісні блокові кріплення. [21]

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

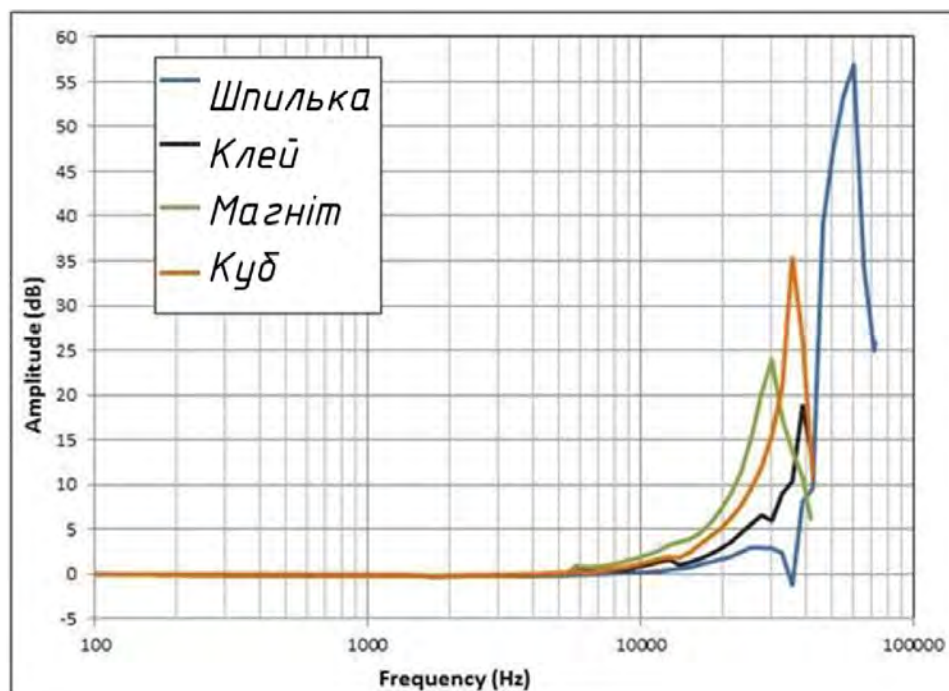


Рис. 1.2.8 – Приблизні частотні діапазони різних типів монтажу ПА [21]

## Висновки до розділу 1.2.

З огляду на численні переваги конструкції типу «зсув», зокрема на загальну надійність, зменшену чутливість до температури та непаддатливість до деформації основи, було обрано саме цей тип конструкції для подальшої розробки. Серед вище приведених методів монтажу, найбільш надійним, практичним та якісним було визнано гвинтовий або шпильковий метод, а отже відповідний конструктивний отвір буде реалізовано у подальшій розробці ПА.

Окрім того, застосування пакетного типу чутливого елементу є доцільним способом підвищення чутливості п'єзоелемента, а отже буде також реалізовано у подальшому. В якості п'єзоелектричного матеріалу було обрано Титанат цирконата свинцю PZT-5H (Plumbum Zirconate Titanate), оскільки він має більшу п'єзоелектричну сталу, ніж інші типи п'єзоелектричних матеріалів та достатню допустиму температуру точки Кюрі. Крім того, матеріал має високі діелектричні властивості та коефіцієнт електромеханічного зв'язку, що робить його високочутливим.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ ТА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ КОНСТРУКЦІЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

У першому розділі було попередньо визначено бажаний тип конструкції проєктованого ПА, обрано тип конструкції ЧЕ та матеріал п'єзопластин. Цей розділ присвячено розробці математичної моделі, розгляду важливих залежностей та уточненню конструктивних особливостей ПА, розробці тривимірної моделі конструкції у програмному середовищі Solidworks, а також вибір матеріалів.

### 2.1. Розробка математичної моделі ПА

Як було описано у попередньому розділі, принцип роботи п'єзоелектричного датчика прискорення полягає в перетворенні вимірюваної величини прискорення в електричний сигнал на основі п'єзоелектричного ефекту, що виникає на гранях пластини із п'єзоматеріалу. Динамічна модель такого датчика може бути еквівалентна системі з одним ступенем свободи, що включає масу ( $m$ ), пружину ( $k$ ) та демпфування ( $c$ ).

Принципова схема математичної моделі такої системи приведена на рисунку 2.1.1. База ПА з'єднана з віброуючою поверхнею. Коли датчик сприймає сигнал прискорення, п'єзоелектричний елемент деформується під дією сили інерції маси, викликаючи зміну заряду та реалізуючи перетворення сигналу прискорення в електричний сигнал.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

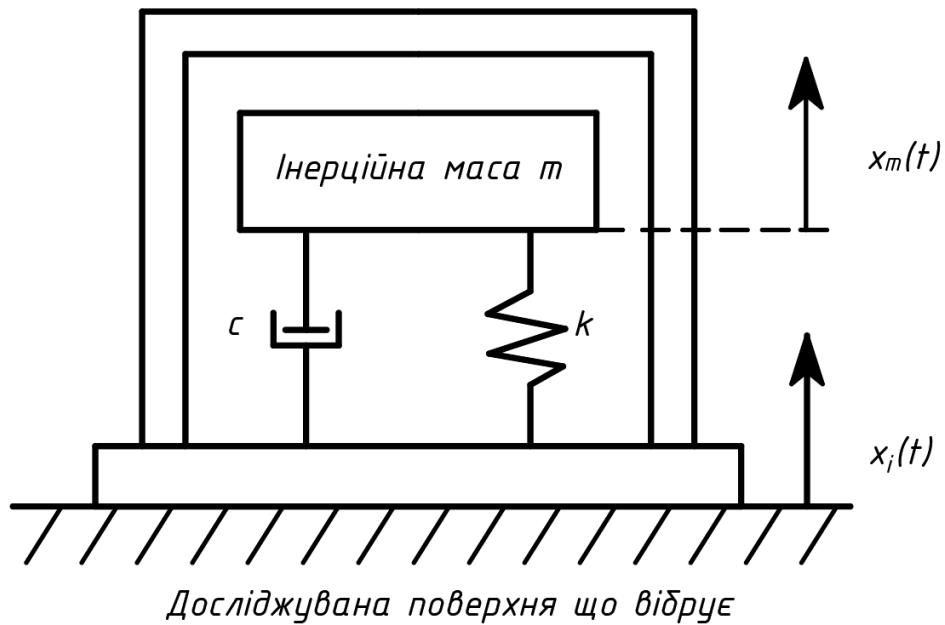


Рис. 2.1.1. – Математична модель ПА

На рис. 2.1.1. зображена інерційна маса ( $m$ ), що розташована в корпусі ПА. П'єзоелектричний матеріал і опір тертя у пристрої виражаються пружиною і демпфером відповідно. Коефіцієнт жорсткості і коефіцієнт демпфування дорівнюють  $k$  і  $c$  відповідно. Коли чутливий елемент сприймає сигнал зовнішнього прискорення (вібрації), на поверхні, що вібрує, виникає переміщення  $x_i(t)$ . Під дією сили інерції, переміщення інерційної маси дорівнює  $x_m(t)$ . Виходячи з цього, переміщення інерційної маси відносно основи  $x_o(t)$  можна виразити так:

$$x_o(t) = x_m(t) - x_i(t); \quad (2.1)$$

Під дією пружини та демпфера рівняння руху сейсмічної маси можна виразити у наступному вигляді:

$$m \frac{d^2 x_m(t)}{dt^2} = -k x_o(t) - c \frac{dx_o(t)}{dt}; \quad (2.2)$$

Підставивши рівняння 2.1 у рівняння 2.2, отримаємо наступне диференціальне рівняння:

$$m \frac{d^2 x_o(t)}{dt^2} + c \frac{dx_o(t)}{dt} + kx_o(t) = -m \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = -ma; \quad (2.3)$$

де  $a$  – вимірюване прискорення.

Виконавши перетворення Фур'є рівняння (2.3) отримаємо:

$$\frac{x_o(j\omega)}{a} = - \frac{\left(\frac{1}{\omega_{\text{власна}}}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{власна}}}\right)^2 + 2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{власна}}}\right)j}; \quad (2.4)$$

де  $\omega_n$  та  $\zeta$  – власна частота коливань та коефіцієнт демпфування ПА відповідно.

$\omega_{\text{власна}}$  та  $\zeta$  розраховуються наступним чином:

$$\omega_{\text{власна}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.6)$$

З рівняння (2.4) можна зробити висновок, що власна частота є одним із важливих параметрів, що впливають на динамічні характеристики датчика, який залежить від маси та сталої жорсткості.

Резонансну частоту ПА можна визначити за формулою 2.7:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.7)$$

Таким чином, із рівняння (2.4) можна отримати наступне співвідношення:

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

$$\left| \frac{x_0}{a} \right| = \frac{1}{\omega_{\text{вслана}}^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{вслана}}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_{\text{вслана}}}\right)^2}} \quad (2.8)$$

У певному діапазоні частот, сила інерції, що виникає у інерційній масі і передається до ЧЕ, приблизно підпорядковується другому закону Ньютона (див рівність 1.5).

Відповідно до визначеного приміщення, кількість заряду, що утворюється на п'єзоелектричному елементі, прямо пропорційна силі:

$$Q = d_{ij}F = d_{ij}ma = d_{ij}kx_0(t), \quad (2.9)$$

де  $d_{ij}$  - п'єзоелектричний модуль використовуваного п'єзоматеріалу ЧЕ.

Об'єднавши рівняння 2.8 та 2.9 можна визначити чутливість п'єзоелемента як відношення виникаючого заряду від прискорення:

$$S_Q = \left| \frac{Q}{a} \right| = \frac{d_{ij}k}{\omega_{\text{вслана}}^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{вслана}}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_{\text{вслана}}}\right)^2}} \quad (2.8)$$

Із цього можна зробити висновок, що чутливість датчика обернено пропорційна власній частоті резонансу і прямо пропорційна п'єзоелектричному модулю. Очікуваним результатом розробки цього проекту є отримання датчика, що володіє високою резонансною частотою та високою чутливістю. У подальшому, чутливість ПА можна покращити шляхом вибору більш специфічних матеріалів з вищим п'єзоелектричним модулем або зниженням власної резонансної частоти конструкції.



## 2.2. Розробка конструкції чутливого елемента

У рамках цього дипломного проекту було зроблено припущення щодо доцільності використання пакетного п'єзоелемента в якості чутливого елемента первинного перетворювача приладу для вимірювання прискорень та вібрацій. Принцип побудови такого ЧЕ було описано у розділі 1.2.1, де і було обґрунтовано переваги такого дизайну.

У програмному середовищі Solidworks було розроблено конструкцію пакетного п'єзоелемента, зображену на рис. 2.2.1:

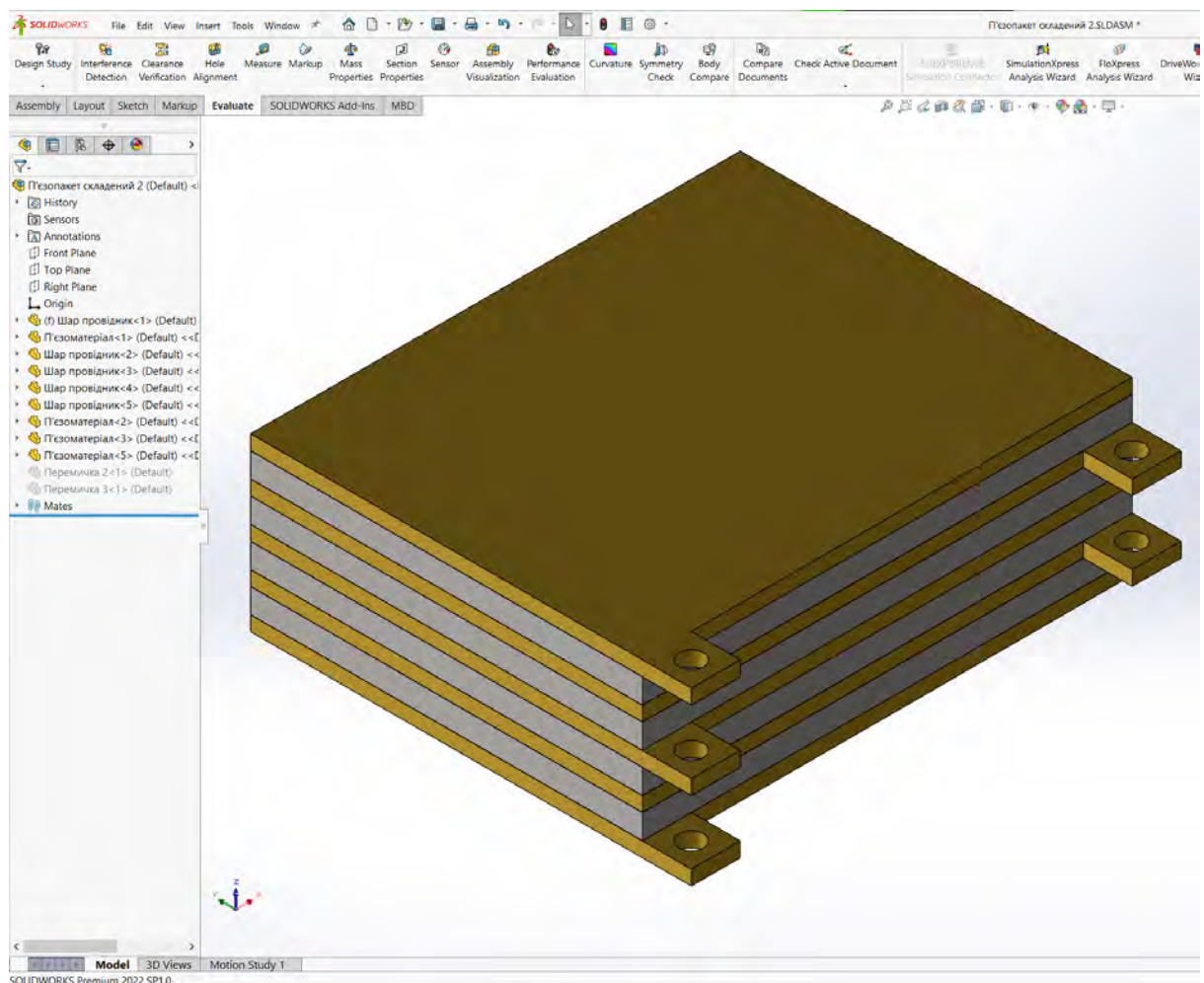


Рис. 2.2.1 – Пакетний п'єзоелемент

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Жовтим кольором позначено п'ять тонких латунних пластинок, товщиною 0.3 мм, що слугують шаром – провідником електричного заряду. Кожна пластинка має окремо винесене вушко з отвором, котрі передбачені для електричного підключення пластин одного заряду між собою. Відтак, при рівномірному прикладенні прискорення до ПА, інерційна маса діятиме на усі пластини в пакеті рівномірно, а отже позитивний електричний заряд передаватиметься на пластинки із вушками, виведеними в один бік, а негативний – на пластини з вушками з іншого боку.

Сірим кольором зображено чотири пластини, товщиною 0.5 мм із цирконату титанату свинця - п'єзоматеріалу марки «PZT-5H», аналогічного до відомого «ЦТС».

Загальна товщина отриманого п'єзопакета становить 3.5 мм, а корисна площа кожної з поверхонь п'єзопластин – 80 мм<sup>2</sup>. Маса одного п'єзопакета становить 1.4 грами. Більш наглядні фізичні та геометричні характеристики п'єзопакета приведені на рис. 2.2.2. та рис 2.2.3.

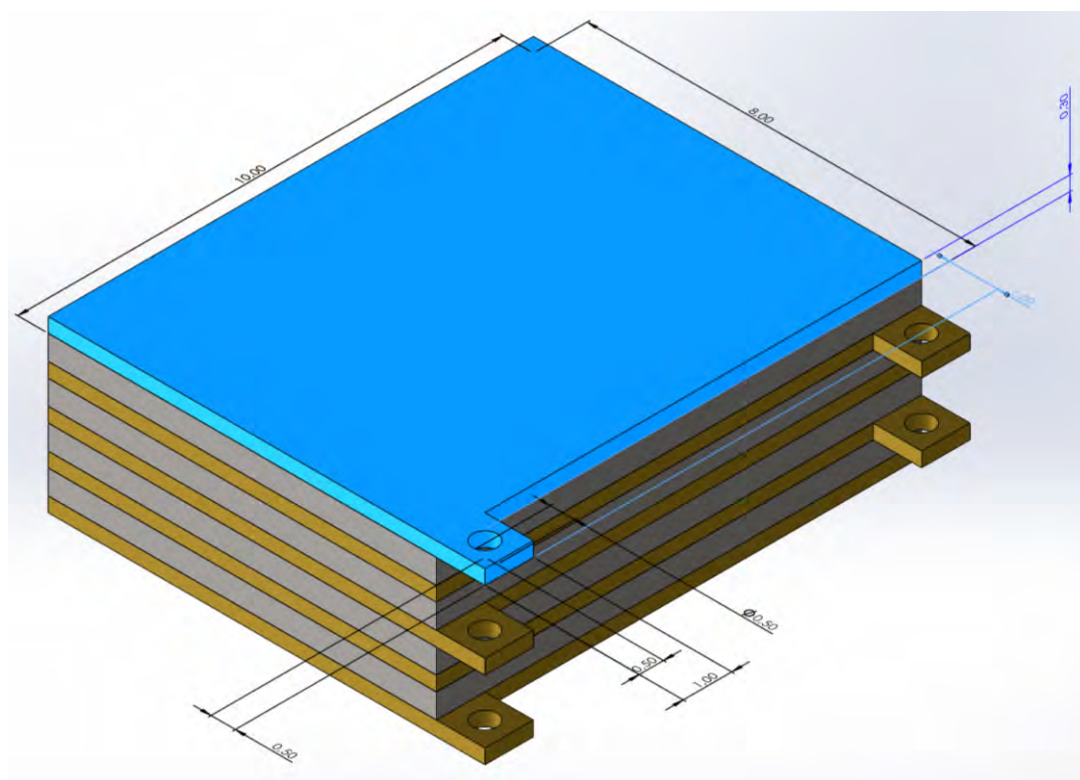


Рис. 2.2.2 – Геометричні характеристики п'єзопакета

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

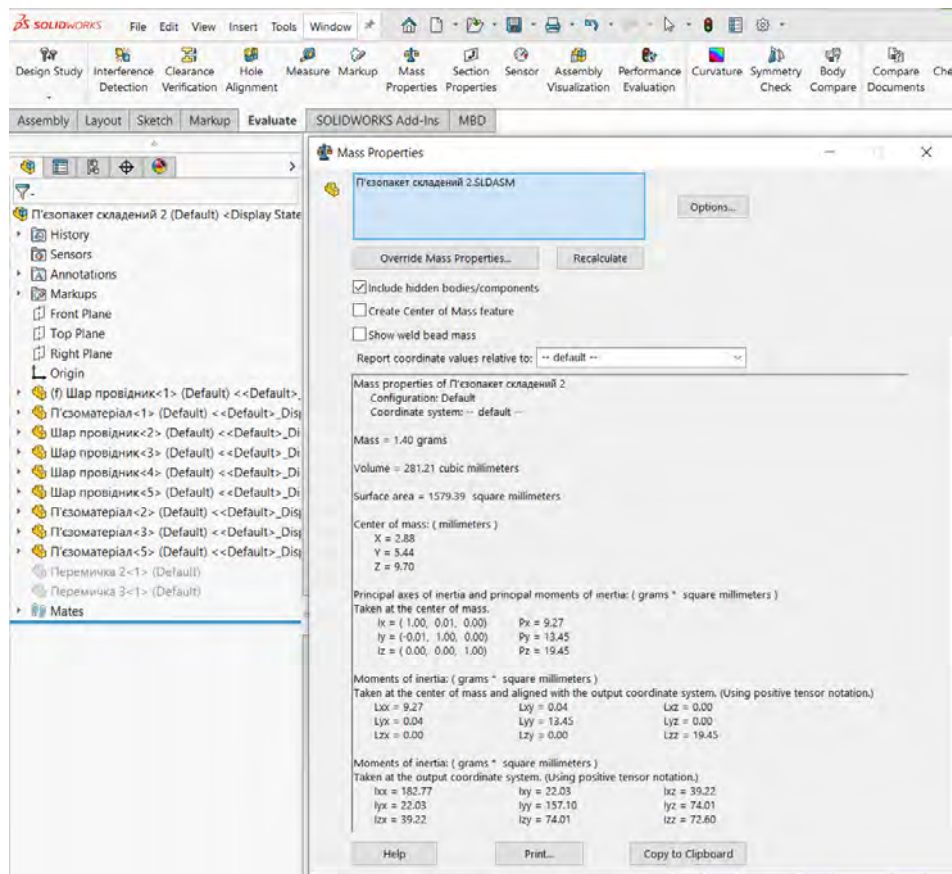


Рис. 2.2.3 – Фізичні характеристики п'езопакета

З огляду на те, що заздалегідь визначеним типом конструкції ПА є конструкція «зсуву», тоді інерційна маса має бути приєднана до одного чи декількох п'езопакетів, що закріплені на центральному жорсткому стрижні. Оскільки виготовлення кільцеподібного пакетного п'езоелементу не доцільне і занадто трудомістке, було прийнято рішення розмістити три однакових п'езопакети на гранях зрізаної трикутної піраміди, що виступатиме в якості стрижня і буде частиною основи п'езопретворювача.

## 2.3. Розробка конструкції п'єзоелектричного акселерометра

### 2.3.1 Вимоги до габаритних розмірів та тривимірне моделювання

Конструкторською задачею в процесі розробки ПА стало досягнення достатньо малих габаритних розмірів приладу, оскільки огляд бойових модулів та систем стабілізації підтвердив, що компактність приладів є однією із бажаних характеристик в умовах тісного замкненого простору в бойовому модулі. Таким чином, бажаний габаритний розмір акселерометра має становити приблизно 30 мм в діаметрі та стільки ж в висоту. Окрім того, підвищена чутливість ПА також є ключовим фактором, що дозволить покращити точність системи стабілізації в умовах різких прискорень та зупинок, руху по нерівній місцевості, а також за наявності високочастотних вібрацій.

Виходячи з цього, була розроблена наступна конструкція ПА, приведена на рис. 2.3.1. Висота розробленого акселерометра становить 25 мм, а діаметр кришки, що приблизно рівний розміру основи, становить 30 мм.

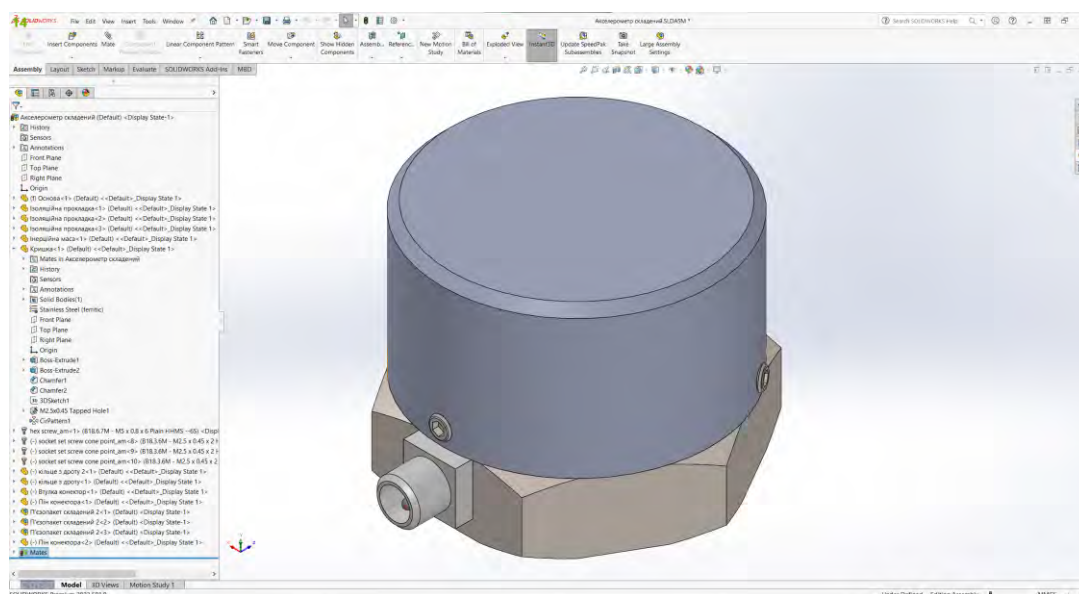


Рис. 2.3.1. – Зовнішній вигляд розробленого п'єзоакселерометра у складеному стані

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

На рисунку 2.3.2 показано акселерометр у рознесеному вигляді, що дає уявлення про конструкцію та взаємозв'язки між деталями: 1 - кришка, 2- прижимний болт М6х0.8, 3 – настановні гвинти М2.5х0.45 з отвором під шестигранний ключ, 4 – ізоляційні проставочні пластини, 5 – пакетні чутливі п'єзоелементи, 6 – інерційна маса, 7 – основа ПА, 8 – втулка-конектор, 9 – електричні контактні штирі.

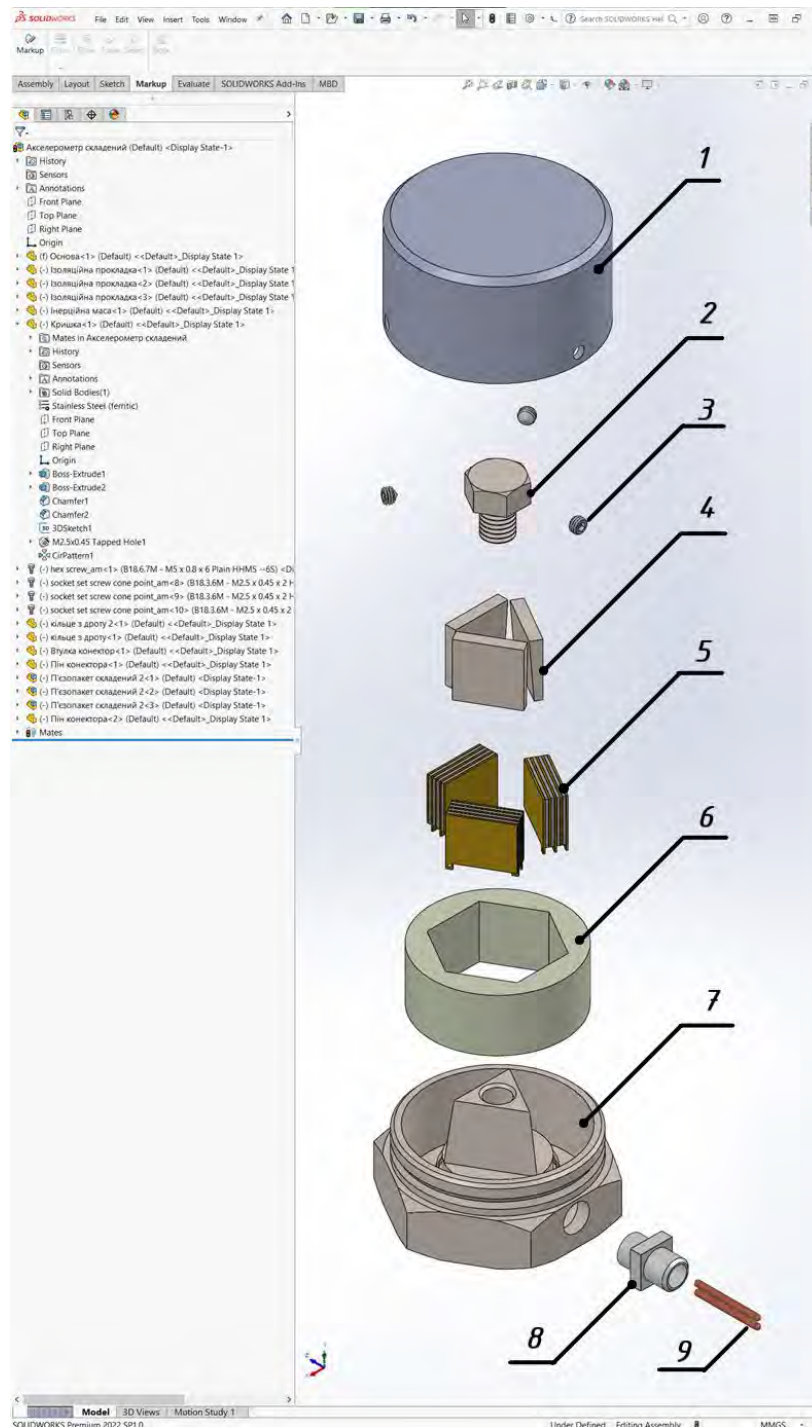


Рис. 2.3.2. – Вид розробленого п'єзоакселерометра у рознесеному стані

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

### 2.3.2. Принцип складання та пояснення конструкції

Для ще більш наочного пояснення таких конструкторських рішень, на рис. 2.3.3. зображено цей же прилад у повздовжньому перерізі. Як можна побачити, розроблений ПА має розбірну будову, що вигідно відрізняє його від більшості наявних на ринку рішень, оскільки останні складаються за допомогою клею. Запропонований тип конструкції містить лише вклеювану у отвір корпусу втулку-конектор, яка є компромісним рішенням, оскільки в силу мініатюрності запропонованого рішення, стандартні коаксіальні роз'єми завеликі, а двоконтактні штекери стандарту «МПЛ» щонайменше вдвічі більші і не підходять для реалізації.

Основа 7 має кругову проточку для фіксації кришки 1 за допомогою трьох настановних стандартних гвинтів M2.5x0.45, що регламентуються стандартами ГОСТ або DIN. Також можна побачити в середині основи зрізану піраміду, бічні грані якої нахилені під  $94^\circ$  до горизонтальної площини, а також має глухий різьбовий отвір зверху. Прижимний болт 2 закручується в цей отвір і своєю шляпкою притискає три ізоляційні проставочні пластини, котрі мають відповідний нахил однієї з їхніх граней. Пластини мають володіти ізоляційними властивостями, і певною жорсткістю для того щоб підвищити резонансну частоту конструкції і ізолювати електричний контакт латунних обкладинок пакетних п'єзоелементів від основи. Клиновидна будова таких ізоляційних пластин дозволяє позбавитися від натяжного кільця, що його зазвичай використовують у ПА зсувного типу, оскільки переміщення гвинта має затягувати ці пластини, тим самим притискаючи п'єзопакети 5 до інерційної маси 6. На зовнішній нижній грані основи є різьбовий отвір M6x0.8 для монтажу ПА за допомогою шпилькового чи болтового з'єднання.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Передбачається, що матеріалом корпусу (основи та кришки) має бути нержавіюча сталь, не піддатлива до корозії, в якості матеріалу для ізоляційних прокладок обрано алюмінієву кераміку (оксид алюмінію  $Al_2O_3$ ), для інерційної маси – вольфрам, втулка-конектор має ізолювати контакти від основи і між собою, тому було обрано ебоніт електротехнічний, штирі контактні із міді, а п'єзопаке́т та його матеріали описані вище. Призначивши усі необхідні характеристики матеріалам, властивості яких симулюються у цій моделі, стало можливим визначити масу проектованого приладу. Вона становитиме близько 110 грамів.

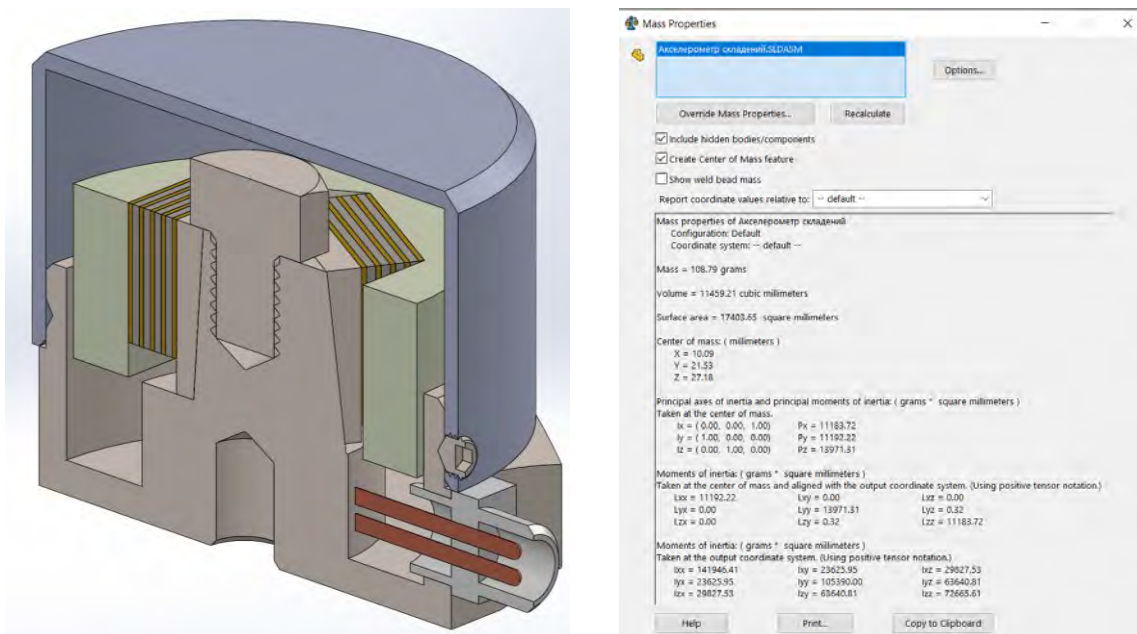


Рис. 2.3.3. –П'єзоелектричний акселерометр у повздовжньому перерізі та його фізичні характеристики

## 2.4. Принцип внутрішнього електричного підключення пакетних п'єзоелементів. Принцип роботи.

Конструкція, розміри та матеріали проектованого акселерометра визначено, тепер стоїть питання з приводу способу підключення чутливих елементів ПА. Із розділу 1.2.1 відомо, що поляризація у матеріалі пластин пакетних п'єзоелементів направлена таким чином, щоб між суміжними гранями двох сусідніх п'єзопластин виникав однойменний заряд, а у розділі 2.2. пояснена будова досліджуваних ЧЕ. Спираючись на це, можна зробити висновок що пластини з однойменними зарядами необхідно з'єднати між собою провідниками з ізолюваним покриттям. Рисунок 2.3.4. схематично демонструє спосіб підключення пластин. Мідним кольором зображено умовні гнучкі дроти, що є обов'язковою частиною внутрішньої схеми електричного підключення. Передбачається, що кінці дротів не припаюються до пластин через мініатюрність конструкції, а точково зварюються за допомогою прецизійної конденсаторної електрозварки. Дроти мають бути обов'язково в ізоляції задля уникнення короткого замикання. Таким чином отримуємо позитивний заряд на одному штирку конектора, а негативний на іншому. А оскільки прискорення чи вібрація може періодично діяти в протилежні сторони вздовж однієї чутливої осі акселерометра, то сигнал буде знакозмінним.

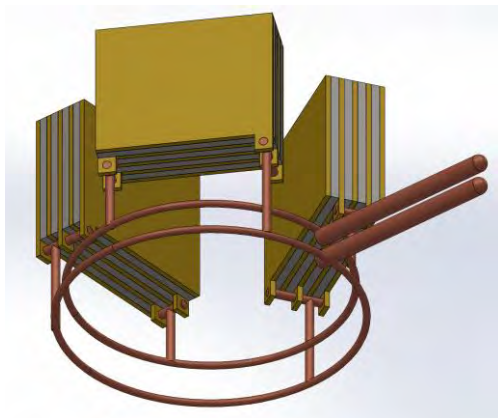


Рис. 2.3.4. – Електричне з'єднання пластин провідниками



## Висновки до розділу 2

Результатом проведеної роботи у другому розділі стала розроблена математична модель із визначеними для неї математичними залежностями між характеристиками проектованого п'єзоелектричного акселерометра та шуканими фізичними величинами.

Також було проведено тривимірне моделювання кожної окремої деталі досліджуваного ПА, розробка його складеної моделі та обґрунтовано використанням тих чи інших конструктивних рішень. Зокрема, було розроблено та пояснено конструкторське втілення обраних у попередньому розділі чутливих елементів, в ролі яких виступають три пакетні п'єзоелементи, а також було визначено та реалізовано конструктивне рішення для можливості гвинтового та шпилькового монтажу.

Окрім того, проектований ПА виконано у відповідності до заздалегідь визначених орієнтовних габаритних розмірів, було призначено матеріали для кожної з деталей, що дало можливість оцінити очікувані масо-габаритні характеристики проектованого акселерометра.

На завершальному етапі розділу було запропоновано та візуалізовано схему внутрішнього з'єднання електричних компонентів приладу та пояснено доцільність такого рішення.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

### РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ У СКЛАДІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

В результаті виконання другого розділу було отримано тривимірну модель проєктованого ПА із досліджуваним прецизійним чутливим елементом, в ролі якого виступають три пакетні п'єзоелектричні елементи. До цієї моделі було обрано матеріали, фізико-механічні характеристики яких було додано із бази даних програмного середовища Solidworks. Це дозволяє провести ряд подальших досліджень із використанням додаткового модуля Solidworks Simulation, що призначений для симуляції та аналізу різноманітних процесів, впливу котрих буде підвергнуто досліджуваний ЧЕ у складі проєктованого ПА.

#### 3.1 Аналіз симуляції динамічного впливу вібрації на модель

Метою цього експериментального дослідження є симуляція шести основних видів вібрації, котрим може бути підвергнуто п'єзоелектричний акселерометр для визначення максимальних напружень у матеріалах конструкції, визначення власної резонансної частоти коливань конструкції для кожного з видів вібрації та визначення залежності між амплітудою переміщення ключових частин конструкції і частотою коливань.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Для виконання симуляції досліджуваного процесу, тривимірній моделі необхідно задати ряд початкових умов, котрі імітуватимуть умови використання приладу. Для проведення модального (частотно-коливального) аналізу, необхідно визначити взаємозв'язки між компонентами моделі, задати закріплену поверхню, котра виступатиме в ролі поверхні, через яку вібрація передаватиметься на модель, побудувати комірчасту сітку для найбільш точного відтворення аналізу, а також обрати необхідні результуючі характеристики, котрі необхідно отримати.

В якості поверхні, через яку досліджувані вібрації передаватимуться на модель, обрано циліндричну поверхню для різьбового монтажу ПА (на шпильку чи болт) до корпусу вимірюваної частини ЛБТ, геометрію якої було спрощено – різьба прихована (рис. 3.1.1)

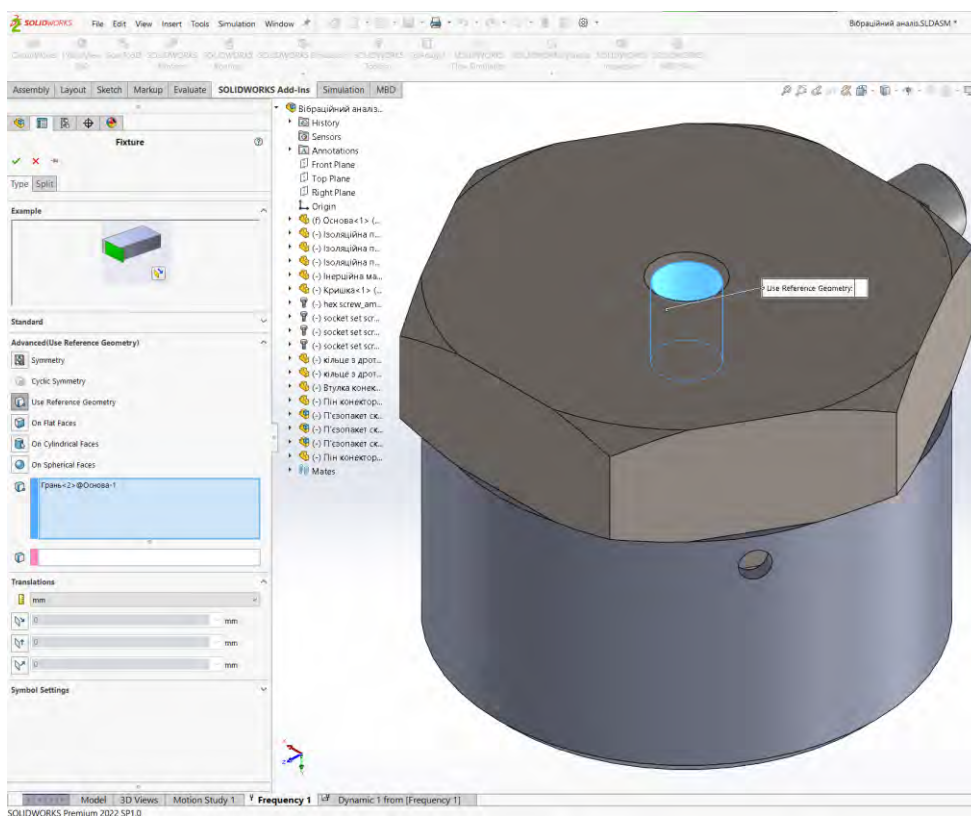


Рис. 3.1.1 – Поверхня жорсткого зацмлення

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

### 3.1.1. Визначення взаємозв'язків між компонентами.

Взаємозв'язки між деталями визначають: як буде розподілена деформація та напруження в матеріалі під дією зовнішнього впливу. На цьому етапі можливо звернутися до автоматичної постановки зв'язків між елементами конструкції, проте такий спосіб викликає велику кількість хибних зв'язків, що призводить до того, що модель зовсім не проявляє ніякої реакції на зовнішні збурення, тому у ручному режимі визначено контактні поверхні кожної з деталей. (рис. 3.1.2)

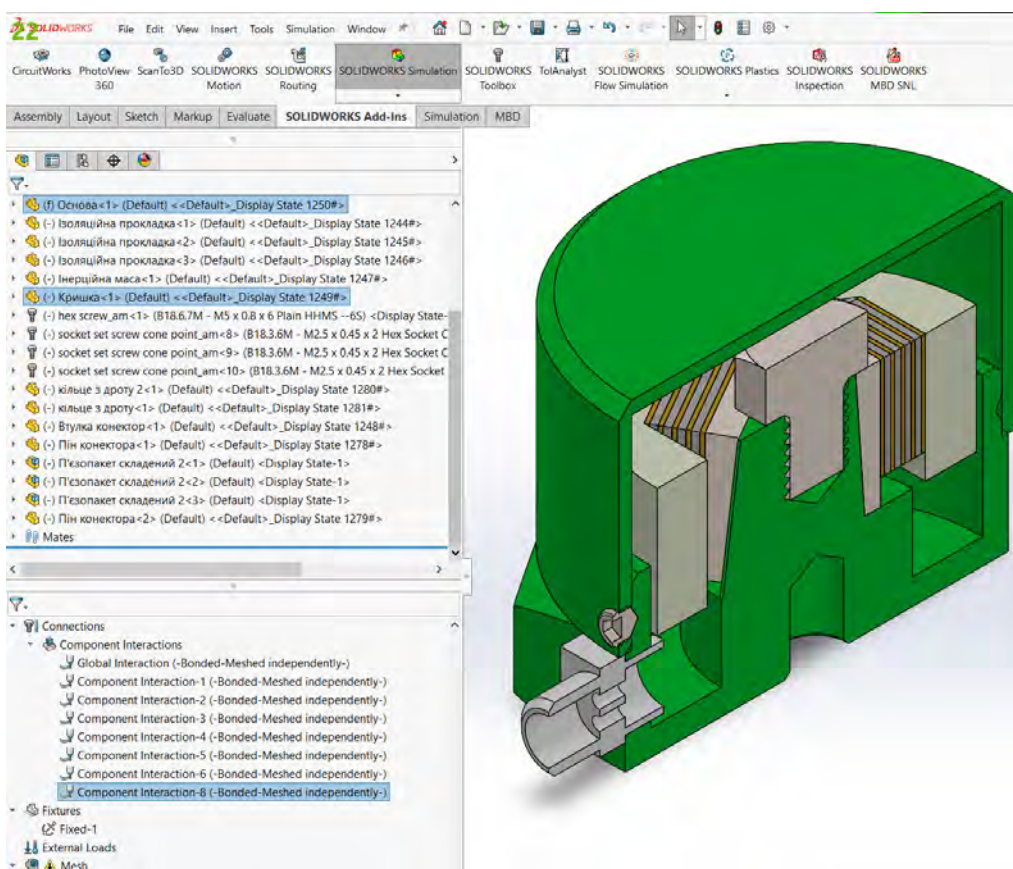


Рис. 3.1.2 – Приклад ручного визначення взаємозв'язків

Важливо уникати повторного обрання однієї поверхні у процесі побудови зв'язків між нею і двома іншими різними деталями, оскільки це або руйнує попередній зв'язок, або надмірно фіксує усю конструкцію.

Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

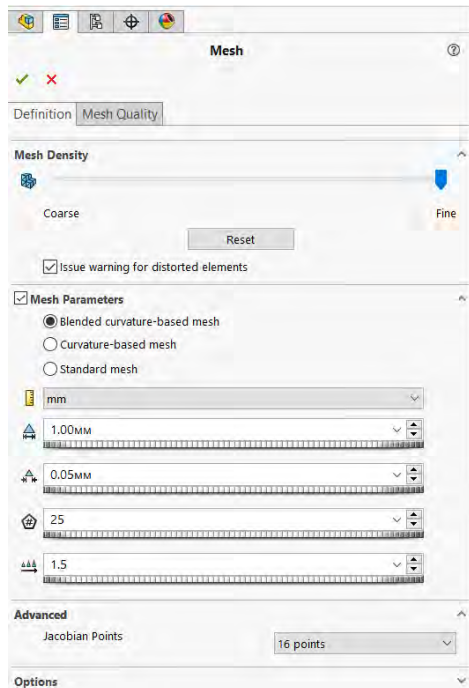
ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ

Арк.

68

### 3.1.2. Побудова полігональної сітки

Побудова полігональної сітки – чи не найважливіший крок у процесі проведення аналізу та симуляції, оскільки від якості побудованої сітки залежатиме подібність досліджуваної геометрії до теоретично-проектованої форми моделі. На рисунку 3.1.3 приведено характеристики побудованої сітки:



Розмір найбільшої сторони комірки: 1 мм

Розмір найменшої сторони комірки: 0.05 мм

Кількість вписаних в коло комірок: 25

Крок приросту розміру комірок: 1.5

Коефіцієнта Якобіана: 16 точок.

(це кількість точок, розташованих у кожному елементі. Коефіцієнт Якобі надзвичайно спотвореного елемента стає від’ємним, що призводить до припинення аналізу.)

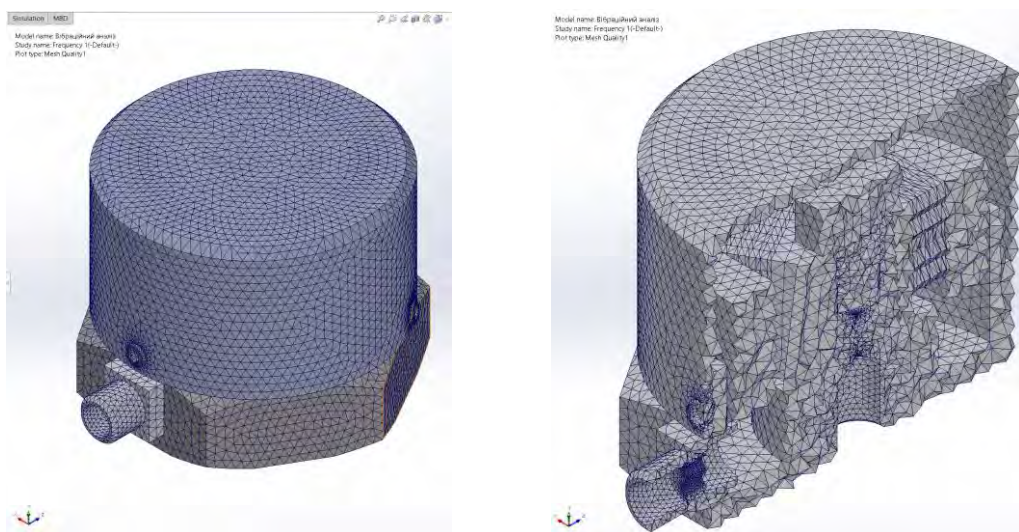


Рис. 3.1.3 – Характеристики побудованої сітки, зовнішній та внутрішній вигляд полігональної структури

### 3.1.3. Дослідження впливу вібрацій

Важливою характеристикою ПА є відгук на різні резонансні частоти, дослідження котрих можливе засобами модального аналізу. Верхня частота зрізу датчика залежить від резонансної частоти амплітудно-частотної кривої. Динамічні характеристики в основному вивчають резонансну частоту конструкції під динамічним навантаженням, яка є важливим параметром у структурному проектуванні. Фізичний зміст досліджуваного явища полягає у тому, що за певної частоти вібрації елементи конструкції матимуть найбільшу амплітуду переміщення у просторі. Підготувавши усі необхідні зв'язки та полігональну сітку, стає можливим дослідити частоти власного резонансу конструкції. У налаштуваннях модуля «Frequency Analysis» задано шість типів вібрації, а саме: три типи вздовж координатних осей XYZ, а три інші – це обертові вібрації навколо цих самих осей, при яких у конструкції виникатиме резонанс. Результати моделювання наведені нижче на рисунках 3.1.4 – 3.1.9.

Слід зазначити, що приведена нижче деформація зображена не у реальному масштабі, а у суттєво збільшеному.

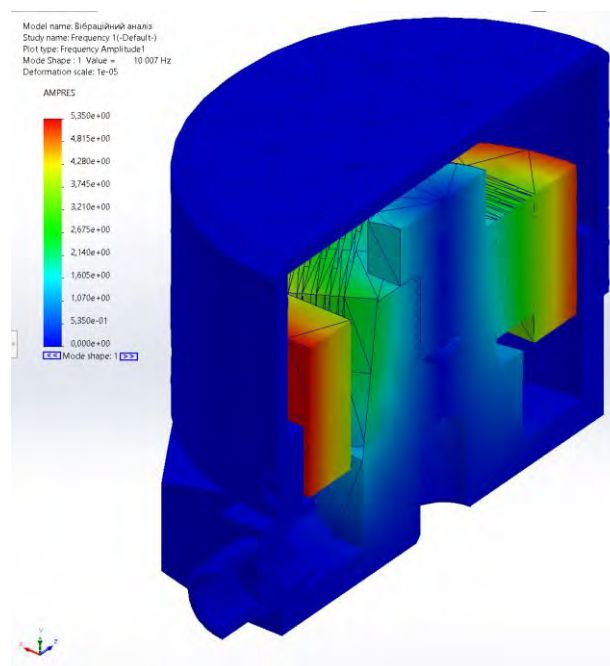


Рис. 3.1.4 – Тип вібрації навколо вертикальної осі Y (№1)

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

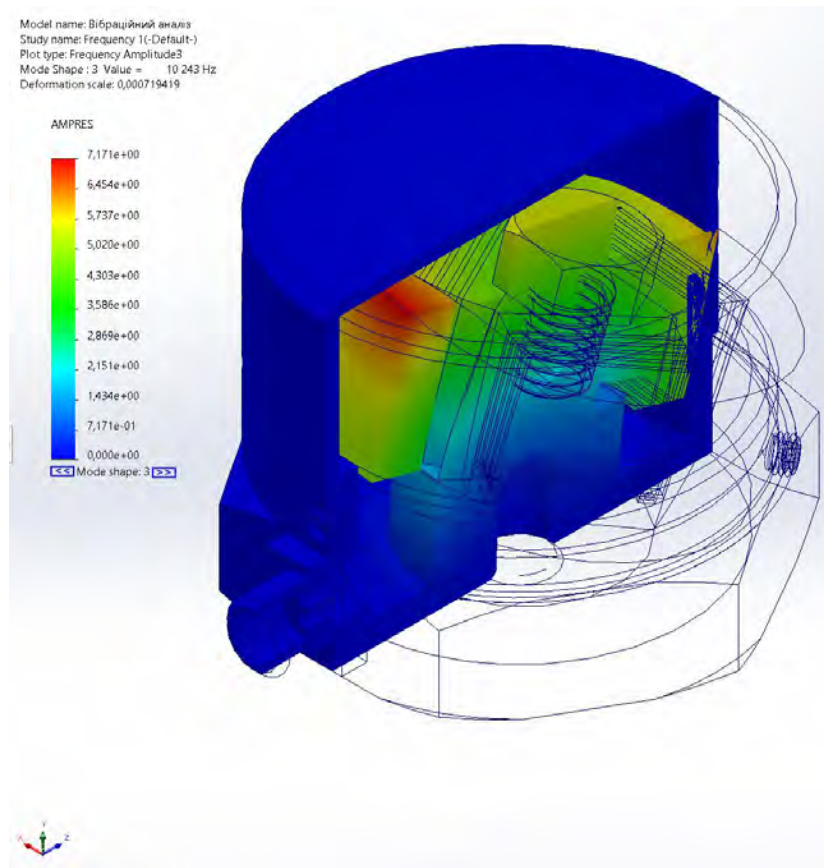


Рис. 3.1.5 – Тип вібрації навколо осі X (№2)

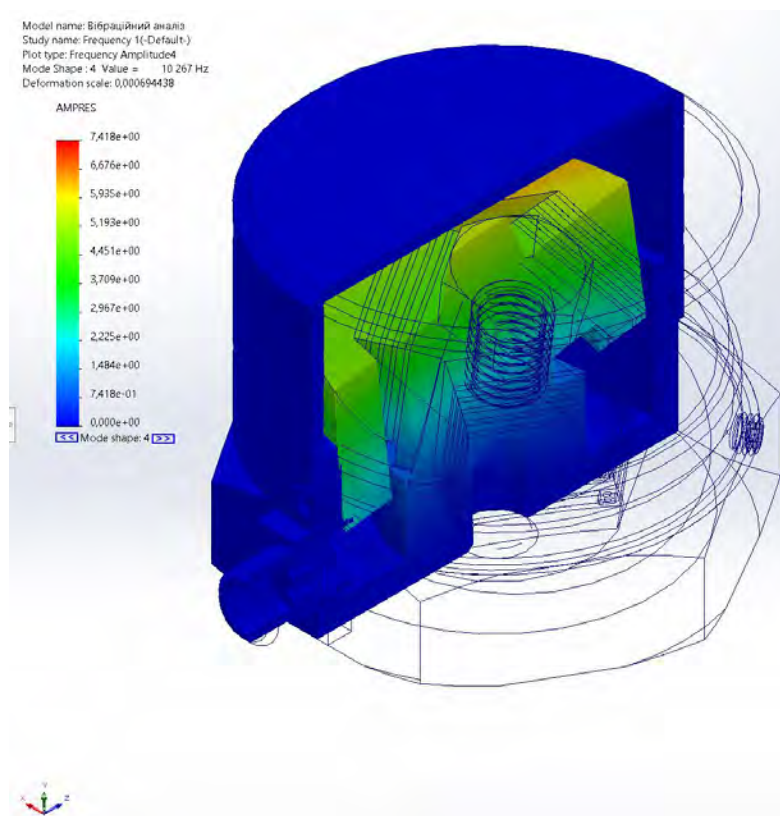


Рис. 3.1.6 – Тип вібрації навколо осі Z (№3)

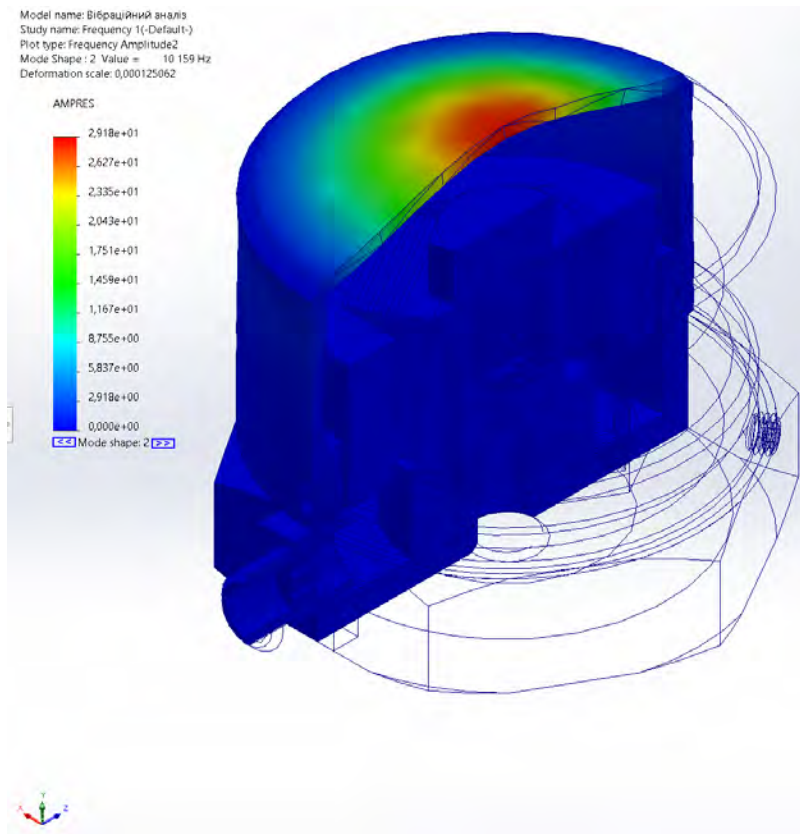


Рис. 3.1.7 – Тип вібрації вздовж вертикальної осі Y (№4)

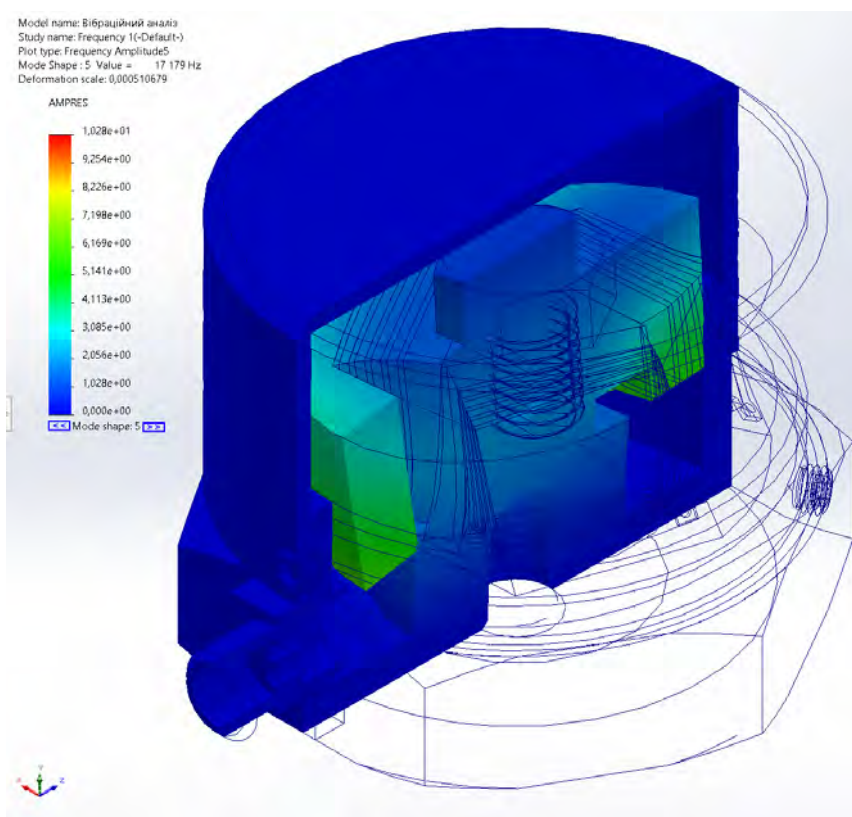


Рис. 3.1.8 – Тип вібрації вздовж осі X (№5)



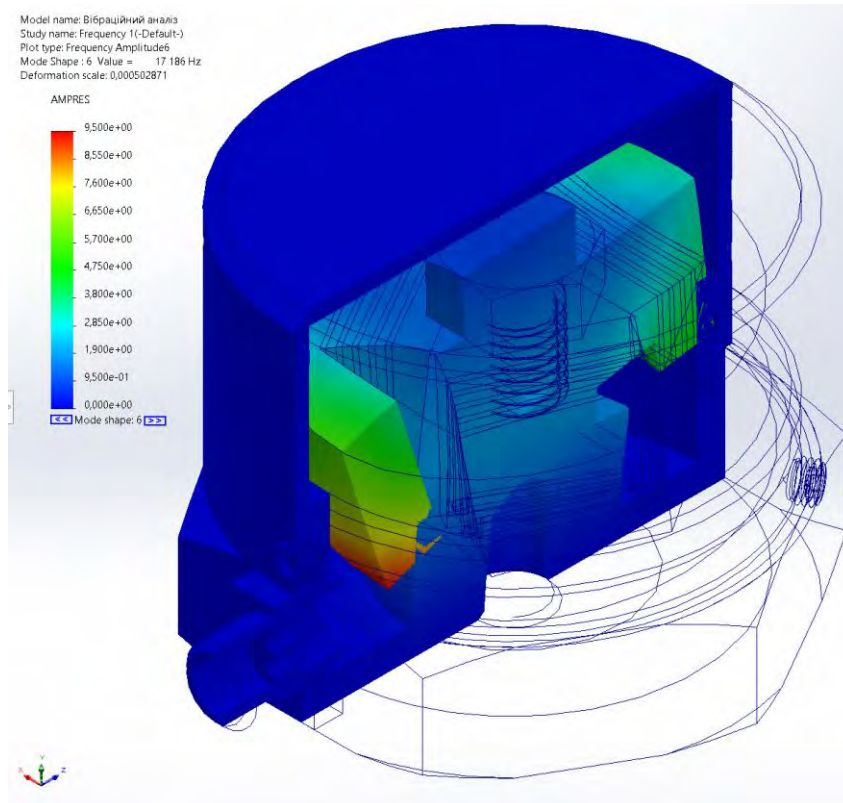


Рис. 3.1.9 – Тип вібрації вздовж осі Z (№6)

Як можна побачити із наведених вище зображень, котрі наглядно демонструють результати симуляції, резонансними частотами для кожного з типів вібрації є наступні значення, що наведено у табл. 3.1:

Таблиця 3.1 – Резонансні частоти відповідно до типу вібрації

Тип вібрації	Резонансна частота
навколо осі Y (№1)	10 007 Hz
навколо осі X (№2)	10 247 Hz
навколо осі Z (№3)	10 267 Hz
вздовж осі Y (№4)	10 156 Hz
вздовж осі X (№5)	17 179 Hz
вздовж осі Z (№6)	17 186 Hz

Графічно цю залежність зображено на рис. 3.1.10. Перші три режими відповідають обертовим вібраціям, а три останні – зворотно-поступальним вібраціям вздовж осей.

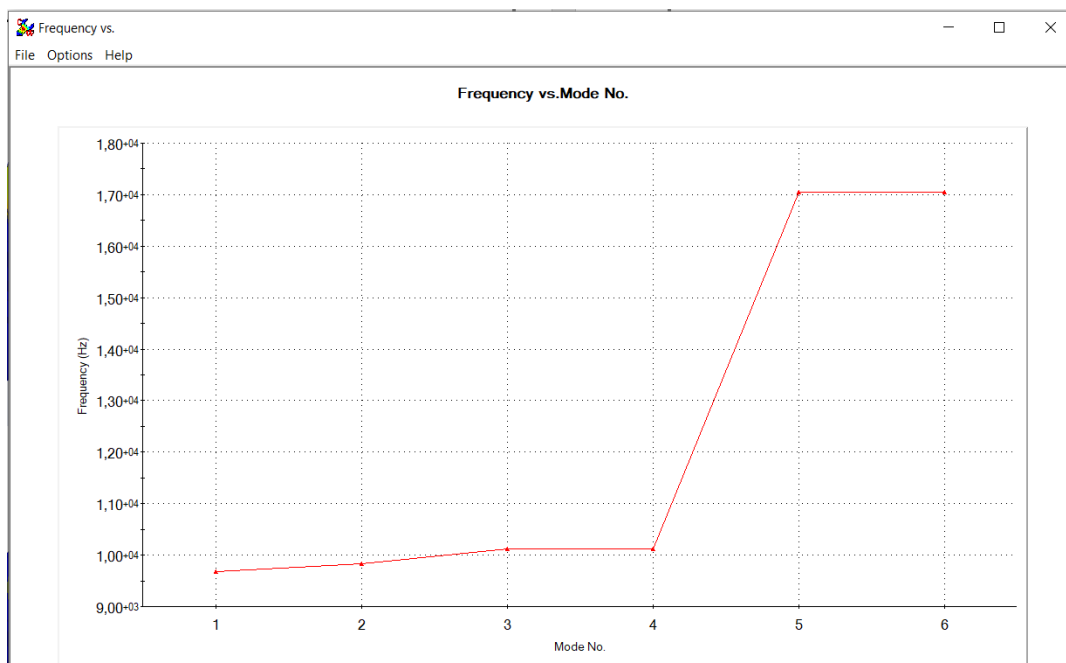


Рис. 3.1.10 – графік залежності резонансної частоти від типу вібрації

Додаткову увагу слід приділити типу вібрації № 4 – вона направлена вздовж вертикальної осі Y, що зображений на рис. 3.1.7. Цей напрям коливань співпадає з віссю чутливості досліджуваних п’єзопластин чутливих елементів, а отже вздовж якої має працювати проєктований п’єзоакселерометр.

На зображенні рис. 3.1.7 не видно якою буде результуюча амплітуда коливань ІМ, оскільки вона губиться у порівнянні з амплітудою коливань кришки. Звісно що кришка у рамках цього дослідження не становить великого значення, отже для наглядності її, разом із гвинтиками, не виключаючи із розрахунку, можна приховати (рис. 3.1.11).

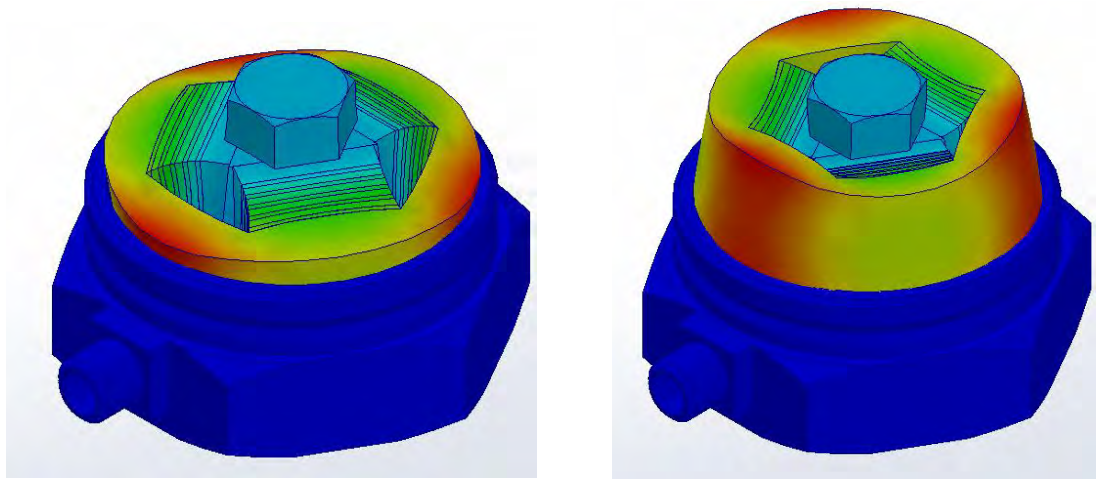


Рис. 3.1.11 – Амплітуда деформації ПА при коливаннях вздовж вертикальної осі у момент зміни вектора прискорення на протилежний

### 3.1.4. Аналіз реакції на гармонійні коливання

З наведеного вище аналізу видно, що резонансна частота датчика, відповідно до його робочої осі чутливості становить 10 156 Гц. Це є підставою для дослідження ПА з метою визначення його робочого діапазону. Для цього проводиться симуляція впливу гармонійних коливань. Збурення інерційного прискорення встановлено у цьому дослідженні прикладено до нижньої частини основи ПА.

Із попереднього дослідження відомо діапазон резонансних частот, отже у цій симуляції буде імітовано саме гармонійні коливання ПА вздовж його осі чутливості на діапазоні від 0 до 20 000 Гц. Коефіцієнти демпфування обрані в автоматичному режимі із бази даних матеріалів програми, в якості речовини навколишнього середовища обрано повітря, 20°C.

У ході проведення дослідження отримано таблицю значень амплітуди переміщення полігональних комірок по трьох компонентах (AMPX, AMPY, AMPZ) та їх результуючої «AMPRES» (рис 3.1.12). Опрацювавши цей масив даних та розподіливши отримані дані по діапазону частот, було отримано графік залежності амплітуди коливань (максимального геометричного відхилення, мм) від частоти (рис. 3.1.13).

Node	AMPX	AMPY	AMPZ	AMPRES
3791	-8,01E-05	-7,48E-04	6,41E-04	9,89E-04
7910	-2,61E-04	-9,20E-04	2,52E-04	9,89E-04
4269	-1,37E-05	4,29E-04	8,92E-04	9,90E-04
3902	-9,08E-05	-6,38E-04	7,51E-04	9,90E-04
3931	-9,39E-05	-9,60E-04	2,27E-04	9,91E-04
4343	-2,06E-05	3,45E-04	9,32E-04	9,94E-04
3816	-7,36E-05	-4,81E-04	8,69E-04	9,96E-04
3973	-9,13E-06	4,58E-04	8,87E-04	9,98E-04
3862	-8,99E-05	-9,69E-04	2,25E-04	9,99E-04
3795	-1,05E-04	-7,74E-04	6,24E-04	1,00E-03
4425	-1,03E-04	-8,63E-04	4,95E-04	1,00E-03
3817	-7,39E-05	-4,68E-04	8,81E-04	1,00E-03
3971	-3,77E-06	5,24E-04	8,54E-04	1,00E-03
4030	-6,89E-05	-3,38E-04	9,44E-04	1,00E-03
4317	-6,56E-05	-2,74E-04	9,69E-04	1,01E-03
3797	-9,20E-05	-9,36E-04	3,68E-04	1,01E-03
4032	-6,60E-05	-2,79E-04	9,69E-04	1,01E-03
3919	-8,71E-05	-6,55E-04	7,64E-04	1,01E-03
7922	2,97E-04	-2,96E-04	9,20E-04	1,01E-03
4540	-5,08E-06	5,41E-04	8,56E-04	1,01E-03
3701	-3,83E-05	1,16E-04	1,01E-03	1,01E-03
4344	-3,85E-05	1,08E-04	1,01E-03	1,01E-03

Рис. 3.1.12 – Необроблений масив даних аналізу впливу гармонійних КОЛИВАНЬ

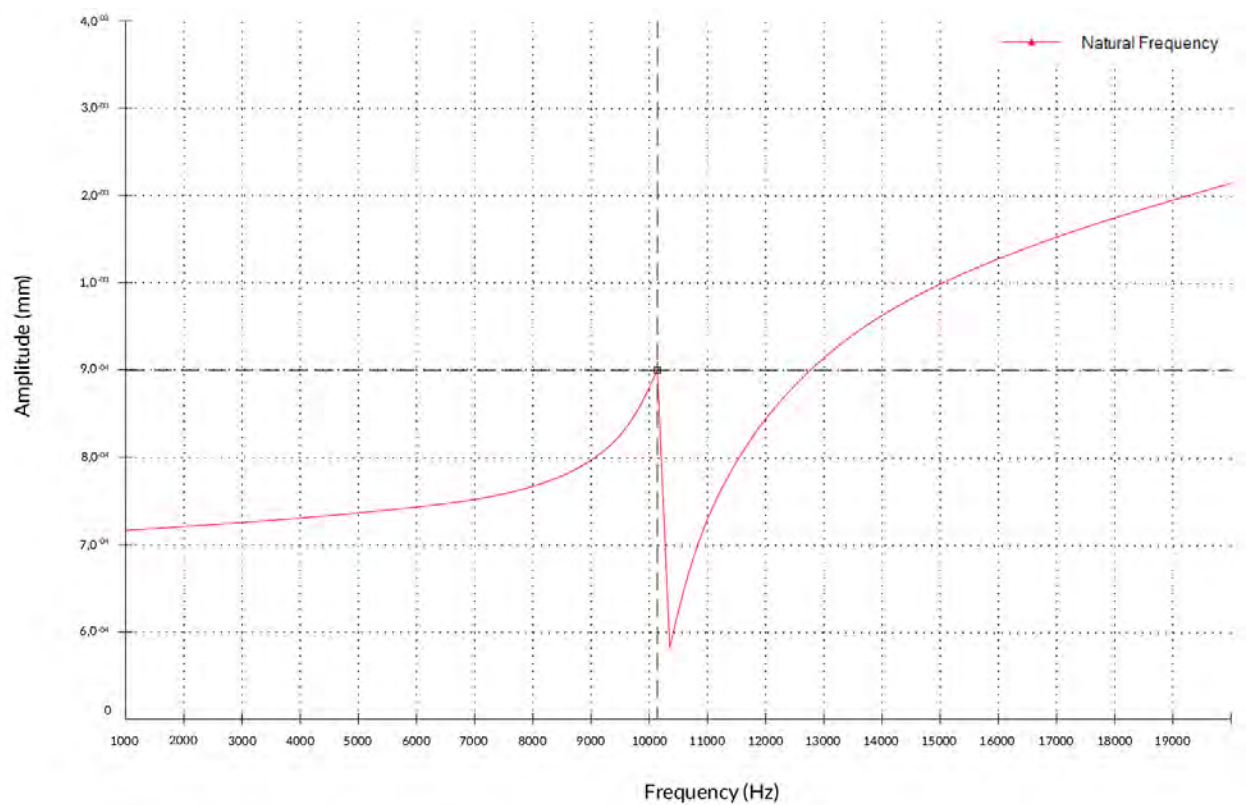


Рис. 3.1.13 – Графік залежності амплітуди коливань від частоти

Відповідно до результатів аналізу за шістьма типами вібрацій, попередньо відомо, що резонансною є саме частота 10 156 Гц, що і можна спостерігати на цьому графіку. Крива резонансної частотної характеристики досягає місцевого піку амплітуди, після чого різко падає, а в подальшому проявляє деяку кривизну. Середня амплітуда коливань до досягнення резонансної частоти становить близько  $7,15 \cdot 10^{-4}$  мм, максимальна амплітуда на резонансній частоті 10 156 Гц сягає  $9 \cdot 10^{-4}$  мм під прискорювальним навантаженням конструкції ПА.

Також можна побачити, що на ділянці графіка, що відповідає діапазону частот від 1000 до приблизно 8 000 Гц графік є близьким до лінійного, а отже цей діапазон приблизно можна вважати придатним для отримання довірчих значень.

## 3.2 Розрахунок параметрів проектованого ЧЕ

### 3.2.1 Розрахунок заряду, напруги та ємності між обкладками однієї п'єзопластини

Відомо, що за другим законом Ньютона, сила, що у процесі використання ПА діятиме на чутливий елемент, залежатиме від маси ІМ, яка розраховуватиметься відповідно до матеріалу, з якого вона буде виготовлена. Оскільки матеріал ІМ у процесі подальших досліджень та розробки може бути змінено, розрахунок напруги, що виникатиме між обкладками п'єзоелемента розраховуватиметься виходячи із сили  $F_y$ , що прикладатиметься до ЧЕ вздовж механічної осі.

$$F_y = 0,1 \text{ кгс} = 0,98 \text{ Н} \quad \text{— прикладена сила;}$$

$$k_1 = 2,74 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н} \quad \text{— п'єзоелектрична стала;}$$

$$d = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad \text{— товщина одної п'єзопластини;}$$

$$S_x = 80 \text{ мм}^2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad \text{— площа поверхні, перпендикулярна електричній осі;}$$

$$S_y = 5 \text{ мм}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad \text{— площа поверхні, перпендикулярна механічній осі;}$$

$$\epsilon = \epsilon_k \cdot \epsilon_0 \quad \text{— діелектрична стала}$$

$$\text{де } \epsilon_k = 3,2 \quad \text{— діелектрична стала для PZT-5Н;}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad \text{— діелектрична стала вакууму;}$$

					<i>ДПБ.ІІМ-91.15.1760.001.ІЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Електричний заряд, що виникатиме на одній п'єзопластині:

$$Q = k_1 \cdot \frac{S_x}{S_y} \cdot F_y$$

$$Q = 2,74 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{8 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,98 = 4,3 \cdot 10^{-11} \text{ Кл} \quad (3.1)$$

Власна ємність п'єзопластини:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S_x}{d}$$

$$C = \frac{3,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,53 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \quad (3.2)$$

Для того щоб розрахувати напругу  $U$ , яка виникає на ємності, що утворена обкладками однієї п'єзопластини, підставимо рівності 3.1 та 3.2:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{k_1 \cdot d \cdot \frac{S_x}{S_y} \cdot F_y}{\varepsilon \cdot S_x}$$

$$U = \frac{2,74 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{8 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,98}{3,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^{-5}} = 9,48 \text{ В} \quad (3.3)$$

Оскільки у проєктованому ПА чутливий елемент складається із трьох пакетних ЧЕ, кожен з яких у своєму складі містить по чотири паралельно підключені п'єзопластини, то загальний заряд п'єзопакета дорівнює сумі зарядів окремих пластин, що знімаються із ПА, і пропорційно збільшує його чутливість, виходячи із рівності 2.8:

$$S_{\Sigma Q} = \left| \frac{\Sigma Q}{a} \right|, \quad (3.4)$$

де  $S_{\Sigma Q}$  – чутливість ПА.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Для того щоб обрахувати числове значення чутливості розробленого ПА, припустимо що для виготовлення деталі «інерційна маса» в якості матеріалу обрано вольфрам, як і було розроблено у тривимірній моделі, тоді її маса складе приблизно  $45 \text{ г} = 0.045 \text{ кг}$ . (рис.3.2.1)

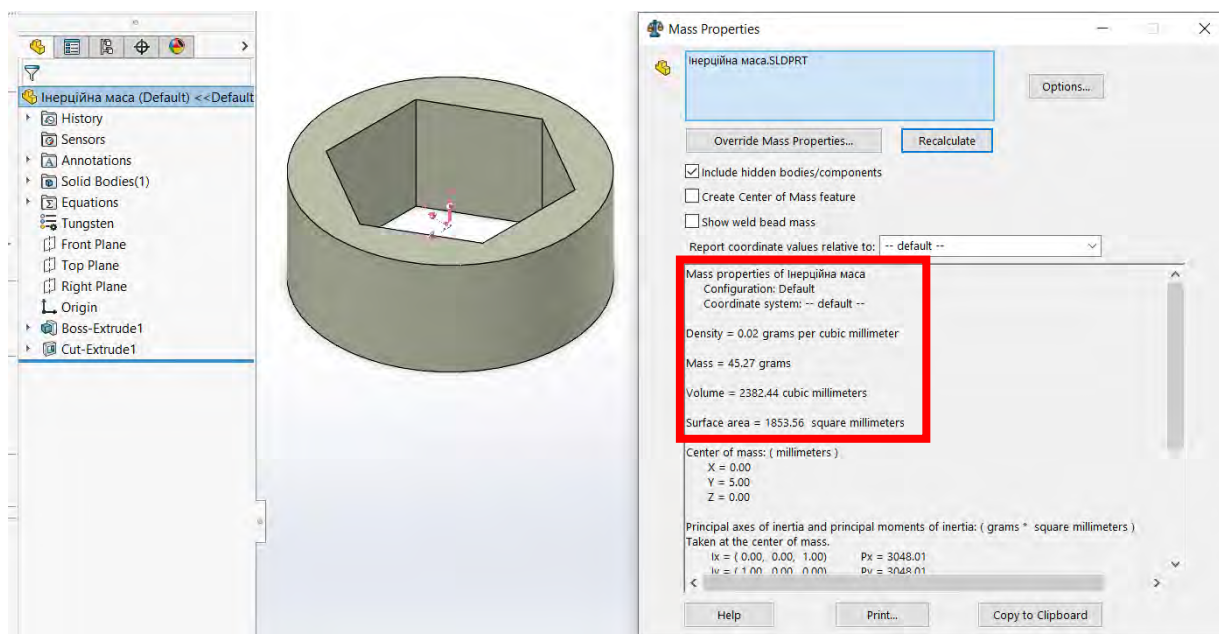


Рис. 3.2.1 – Вольфрамова «інерційна маса»

Тоді сила, прикладена до п'єзоелемента, за умови вимірюваного прискорення  $1 \text{ м/с}^2$  становитиме:

$$F_y = 0,045 \text{ Н} \quad (3.5)$$

Звідси кількість заряду, що знімається з трьох п'єзопакетів буде рівною сумі зарядів усіх задіяних п'єзопластин:

$$\Sigma Q = 12 \cdot 2,74 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{6,4 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,045 = 2,37 \cdot 10^{-11} \text{ Кл} \quad (3.6)$$

Отже чутливість ПА становить:

$$S_{\Sigma Q} = 2,37 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/г} \quad (3.7)$$



### 3.2.2 Еквівалентна схема підключення ПА

Визначена вище напруга не є остаточним значенням у розрахунках, оскільки пристрій, що споживає потужність розряджатиме ЧЕ у момент генерації електричного заряду, і тому вимірювання цієї напруги не можуть бути зняті безпосередньо. Для вирішення цієї задачі необхідно звернутися до канонічних еквівалентних електричних схем підключення чутливого п'єзоелементу.

На рис. 3.2.2 приведено дві класичні еквівалентні електричні схеми підключення, в котрих ЧЕ представлений джерелом заряду або джерелом напруги.

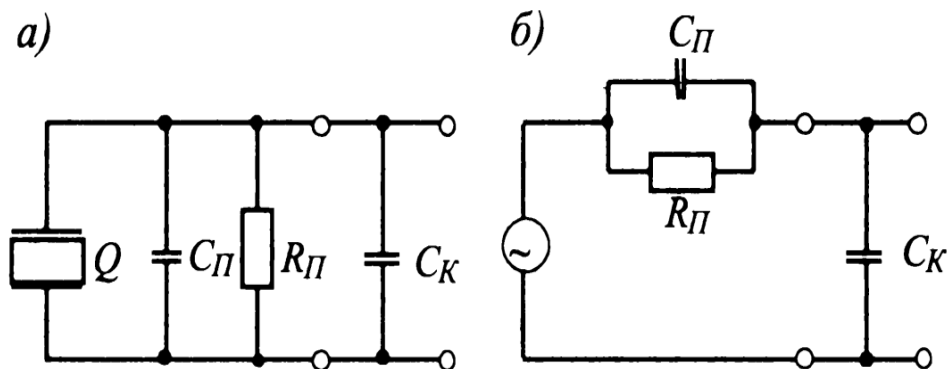


Рис. 3.2.2 - Електрична схема підключення ЧЕ із джерелом заряду (а) та із джерелом напруги (б)

Як можна побачити, для резонансного діапазону чутливий елемент приладу для вимірювання прискорень можна виразити у вигляді паралельного підключення ємності  $C_{\Pi}$  та опору  $R_{\Pi}$ , а в якості навантаження для чутливого елемента являється ємність кабелю  $C_K$ .

На основі цього можна виразити наступну залежність:

$$U = \frac{Q_{\text{П}}}{C_{\text{П}} + C_{\text{К}}} \quad (3.8)$$

Виходить, що напруга залежить від власної ємності кабелю, яким підключається ПА, а заряд  $Q_{\text{П}}$  – навпаки, не залежить від ємності. В дійсності, ПА підключатиметься у схеми для вимірювання та підсилення заряду, а значить ємності вхідного кола підсилювача  $C_{\text{ВХ}}$  та комутаційного кабелю  $C_{\text{К}}$  підключатимуться паралельно його власній ємності  $C$ . Звідси випливає, що формула для розрахунку напруги, що виникне на п'єзоелектричному акселерометрі може бути записана наступним чином:

$$U = \frac{Q_{\text{П}}}{C + C_{\text{ВХ}} + C_{\text{К}}} \quad (3.9)$$

Це означає, що задля досягнення найбільшої чутливості ПА та найвищого значення напруги, потрібно за можливості зменшувати ємності вхідного кола підсилювача  $C_{\text{ВХ}}$  та комутаційного кабелю  $C_{\text{К}}$ . Ця особливість є значною в умовах реального застосування проектованої системи, а отже нехтувати нею не можна.

Зручним та поширеним методом прийому сигналу від ПЕ є метод підсилення заряду, схема якого приведена на рисунку 3.2.3.

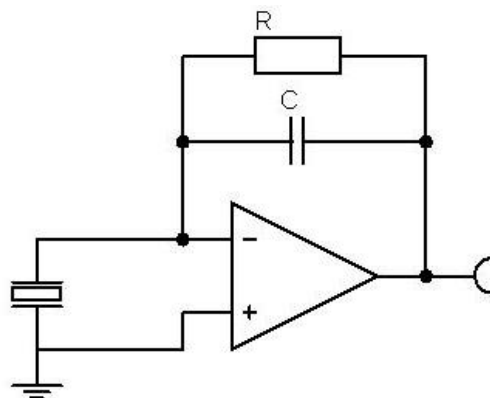


Рис. 3.2.3. - Електрична схема підключення ЧЕ із джерелом заряду (а) та із джерелом напруги (б)

У схемі на рис. 3.2.3, інвертуючий вхід операційного підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком, має нульовий потенціал. Це означає, що напруга на опорі витоку і сумарної ємності перетворювача і кабелю дорівнюють нулю. Весь заряд накопичується на конденсаторі, а вихідна напруга дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{C} \int \left( \frac{k dx}{dt} \right) dt = -\frac{kx}{C} \quad (3.10)$$

де  $x$  - відносна деформація п'єзопластини

Виходячи із рівності 3.6, можна визначити напругу, що виникає на виході ПА, але попередньо передбачити якою буде внутрішня ємність схеми підключення достеменно неможливо, бо вона залежатиме від конкретних характеристик комутаційних кабелів, на окремих елементів схеми.

Проте якщо теоретично припустити, що напруга, що зніматиметься з ПА не перебільшуватиме 9В, тоді стає можливим визначення необхідного значення власної ємності схеми  $C_{\text{сх}}$ , при якому напруга, що знімається з ПА і подається на вхід підсилювача становить:

$$C_{\text{сх}} = \frac{\Sigma Q}{U} - \Sigma C \quad (3.11)$$

$$C_{\text{сх}} = \frac{12 \cdot 4,3 \cdot 10^{-10}}{9} - 12 \cdot 4,53 \cdot 10^{-12} = 5,18 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \quad (3.12)$$

### 3.2.3 Структурна схема п'єзоелектричного акселерометра

Структурна схема перетворювача такої фізичної величини як прискорення може бути реалізована двома методами. Відрізнятимуться ці схеми наявністю двох додаткових ланок, що відповідатимуть за від'ємний електромеханічний зв'язок з метою зменшення температурних та часових похибок, хоча технологічно їх реалізація значно складніша, а отже і використовують такі схеми значно рідше.

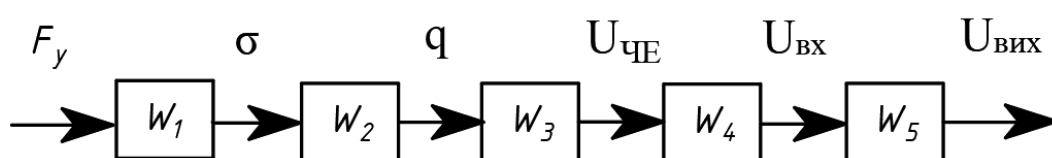


Рис. - 3.2.4. Структурна схема акселерометра прямої дії

На приведеній вище схемі (рис.3.2.4), ланка  $W_1$  відповідає за перетворення сили  $F_y$ , що передається на чутливий елемент під дією інерційної маси. Ця сила прямо пропорційна до прискорення, яке вимірює проєктований прилад. Зазначена сила перетворюється в механічне напруження  $\sigma_1$ . Це механічне напруження рівне силі, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу тіла, тобто  $\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta S}$ , а у випадку, коли напруження постійне на всій площі перерізу, тоді  $\sigma = \frac{F}{S}$ , а отже:

$$W_1 = \frac{\sigma}{F} = \frac{1}{S} \quad (3.13)$$

Ланка  $W_2$  відповідає за процес виникнення електричного заряду  $q$  на обкладинках п'єзопластин під дією механічного напруження  $\sigma$ . Заряд  $q$  пропорційний до значення п'єзоелектричного модуля матеріалу ЧЕ, отже

$$q = d_{ij} \cdot S \cdot \sigma \quad (3.14)$$

$$W_2 = \frac{q}{\sigma} = d_{ij} \cdot S \quad (3.15)$$

Ланка  $W_3$  відображає перетворення отриманого заряду  $q$  у напругу, що умовно позначено  $U_{чЕ}$ . Оскільки чутливий п'єзоелемент характеризується не тільки властивістю генерувати електричний заряд, а і власною ємністю та опором, то і процес вищезазначеного перетворення можливо зобразити у вигляді еквівалентної схеми із кількома відповідними окремими елементами: (рис.3.2.5).

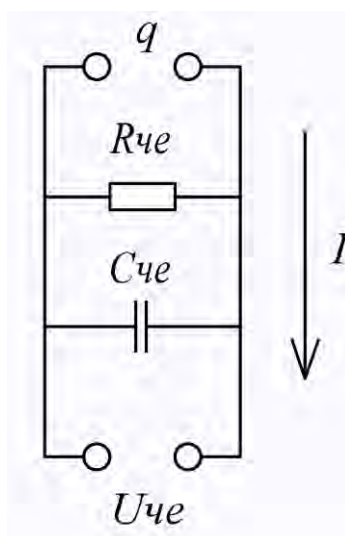


Рис. - 3.2.5. – Рівноцінна схема ланки  $W_3$

Струм  $I$ , що виникатиме на цьому етапі:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{U_{чЕ}}{R_{чЕ}} + C_{чЕ} \frac{dU_{чЕ}}{dt} \quad (3.16)$$

Розв'язком цього рівняння матиме вигляд за нульових початкових умов стане:

$$U_{чЕ} = \frac{q}{(1 + \frac{1}{j\omega R_{чЕ} C_{чЕ}}) C_{чЕ}} \quad (3.17)$$

Передаточна функція третьої ланки дорівнює:

$$W_3 = \frac{U_{чЕ}}{q} \quad (3.18)$$

Опір чутливого елементу є досить великим, тому можна спростити:

$$W_3 = \frac{1}{C_{ЧЕ}} \quad (3.19)$$

Процес, що втілює четверта ланка  $W_4$  – явище подання напруги з п'єзоперетворювача на операційний підсилювач. Її також можна зобразити еквівалентною схемою, що наведена на рис. 3.2.6.

$R_{ВХ}$  позначає вхідний опір підсилювача напруги, а оскільки чутливий п'єзоелемент має великий опір, то вхідна частина підсилювача представлена лише цим опором.

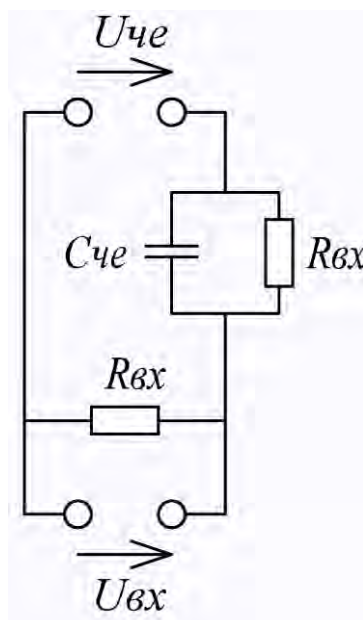


Рис. - 3.2.6. – Рівноцінна схема ланки  $W_4$

Тоді для цієї схеми будуть вірними рівності:

$$U_{ВХ} = I_C + I_R R_{ВХ}, \quad (3.20)$$

де  $I_C$  та  $I_R$  -струми на ємності та на опорі відповідно

$$I_C = C_{ЧЕ} \frac{dU_{ЧЕ}}{dt} \quad (3.21)$$

$$I_C = \frac{U_{\text{ЧЕ}}}{R_{\text{ЧЕ}}} \quad (3.22)$$

$$U_{C_{\text{ЧЕ}}} = I_R R_{\text{ЧЕ}} = U_{\text{ЧЕ}} - U_{\text{ВХ}} \quad (3.23)$$

$$U_{\text{ВХ}} = C_{\text{ЧЕ}} R_{\text{ВХ}} \frac{d(U_{\text{ЧЕ}} - U_{\text{ВХ}})}{dt} + \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ЧЕ}}} (U_{\text{ЧЕ}} - U_{\text{ВХ}}) \quad (3.24)$$

Якщо ввести коефіцієнт  $\varepsilon_R$ :

$$\varepsilon_R = \frac{R_{\text{ЧЕ}} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} \quad (3.25)$$

Та ввести сталу часу:

$$\tau = R_{\text{ЧЕ}} C_{\text{ЧЕ}} \quad (3.26)$$

Отримаємо:

$$\left(1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p\right) U_{\text{ВХ}} = \frac{1}{\varepsilon_R} (1 + \tau p) U_{\text{ЧЕ}} \quad (3.27)$$

Отже для ланки  $W_4$  передаточна функція буде рівною:

$$W_4(p) = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ЧЕ}}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \quad (3.28)$$

Операційний підсилювач напруги виражений п'ятою ланкою  $W_5$ . Він є інерційною ланкою першого порядку:

$$W_5(p) = \frac{k}{1 + p \tau} \quad (3.29)$$

де  $k$  – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача;

$\tau = \frac{k}{2\pi f}$  - стала часу.

Таким чином, загальна передаточна функція схеми без зворотнього електромеханічного зв'язку становитиме:

$$W(p) = W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5 \quad (3.30)$$

Описана вище структурна схема реалізує принцип прямої дії, що може бути підґрунтям для появи похибок, пов'язаних із температурною нелінійністю властивостей п'єзоматеріалу чи похибок, які виникають із плином часу в силу особливостей конструкції. Для того щоб їх передбачити, деякі конструкції п'єзоперетворювачів реалізують по принципу структурної схеми зі зворотнім зв'язком, наведеної нижче на рис. 3.2.7.

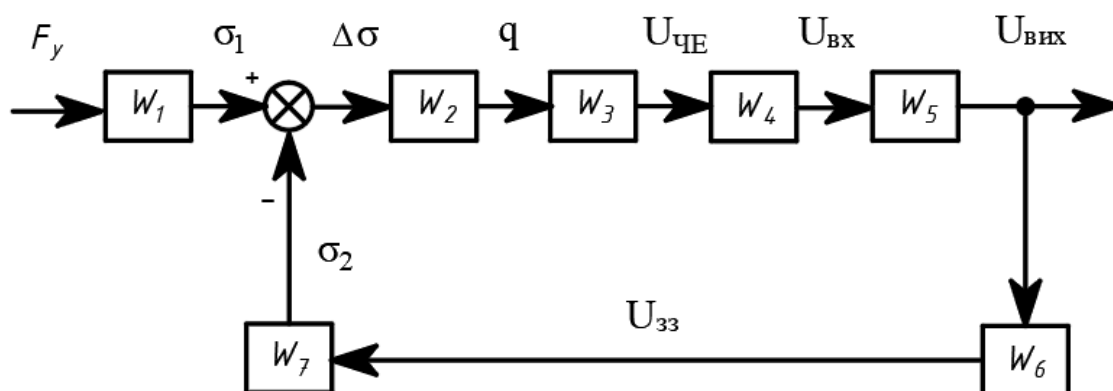


Рис. 3.2.7 Структурна схема акселерометра із зворотнім зв'язком

Ця схема відрізняється від зазначеної раніше лише наявністю ще двох ланок,  $W_6$  та  $W_7$  покладених у від'ємний зворотній зв'язок.

Ланка  $W_6$  відтворює процес, що є зворотнім до ланки  $W_4$ , а ланка  $W_7$  – перетворює напругу, отриману з ланки  $W_6$  назад в механічне напруження п'єзоматеріалу.



### Висновки до розділу 3

У третьому розділі даного проекту було проведено поетапну побудову полігональної сітки та налаштування взаємозв'язків між компонентами досліджуваної моделі для проведення більш точної симуляції гармонійних коливань, прикладених до контактної поверхні проектованого приладу.

Було визначено резонансні частоти для шести режимів вібрації приладу, проведено аналіз результатів симуляції із визначенням амплітуди коливань у цих режимах. Також було отримано масив значень результуючої амплітуди коливань кожної із комірок полігональної сітки у режимі вібрації, що співпадає із цільовою віссю чутливості ПА. Цей масив було розподілено по частотному діапазону за визначено довірчий діапазон частот приладу, на якому графік наближений до лінійного. У завершенні було розраховано теоретичні електромеханічні характеристики п'єзоакселерометра, запропоновано схему його підключення та зображено структурну схему, що описує перехідні процеси у приладі та схемі його підключення.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

## ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

В ході цього дипломного проектування було опрацьовано значний обсяг літературного матеріалу довідкового, теоретичного та практичного характеру. Було досліджено тактико-технічні характеристики вітчизняної легкої броньованої техніки (ЛБТ), визначено складові частини та характеристики актуальних автоматизованих систем стабілізації озброєння (СО). Також було визначено призначення проектованого прецизійного чутливого елементу системи, в якості якого обрано п'єзоелектричний акселерометр (ПА).

З огляду на це, було досліджено природу п'єзоелектричних властивостей, їх роль та принцип дії у складі ПА. Як наслідок, було проведено дослідження та порівняння ключових п'єзоелектричних властивостей, якими характеризуються п'єзоматеріали (ПМ), їх було порівняно та обрано найбільш підходящий в якості матеріалу для застосування та дослідження.

В ході подальшого виконання було досліджено можливі види п'єзоефекту, серед яких виокремлено той, що є перспективним для використання у дипломному проекті. Визначено типи конструкції та будову ПА, обрано підходящий та розроблено конструкцію проектованого ПА. У програмному середовищі САПР Solidworks було спроектовано тривимірну модель, призначено матеріали елементів конструкції та розраховано його масо-габаритні характеристики.

Розроблену модель у програмному середовищі для структурного аналізу Solidworks Simulation було досліджено на реакцію до різних режимів вібрації та коливань, виокремлено резонансну частоту ПА у відповідності до робочого напрямку осі його чутливості, визначено його довірчий діапазон частот роботи шляхом побудови графіку залежності амплітуди від частоти та розраховано його електромеханічні характеристики. У завершенні було запропоновано типову схему підсилення вихідного сигналу, а також приведено структурну схему процесів які відбуваються у проектованому приладі.

					<i>ДПБ.ПМ-91.15.1760.001.ПЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] - Ukrainian Military Pages «Тактико-технічні характеристики бойового модуля «Грім» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.ukrmilitary.com/2015/11/bm-grim.html>
- [2] - ДК "Укрспецекспорт" «БОЙОВИЙ МОДУЛЬ КБА-105 «ШКВАЛ» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://web.archive.org/web/20160909235554/http://ukrspecexport.com/index/catalogue/t/armor/lang/ua/id/51>
- [3] - БМП-1УМ [Електронний ресурс]. Доступно: [File:BMP-1UM\\_left-front\\_view.jpg](File:BMP-1UM_left-front_view.jpg)
- [4] - ТЕСНіmpex Бойовий модуль «Спис синтез» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.tie.in.ua/portfolio/spis-sintez/>
- [5] - АТЕН, 2002-2015; «БМ ШТУРМ» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.army-guide.com/rus/product3873.html>
- [6] - Bob Adams «Штурм» на БТР-3Е [Електронний ресурс]. Доступно: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BC\\_\(%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C\)/#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Kharkiv\\_Morozov\\_BTR-3E1\\_APC\\_\(9689290574\).jpg](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BC_(%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C)/#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Kharkiv_Morozov_BTR-3E1_APC_(9689290574).jpg)
- [7] - 2007-2016 eRepublik «Випуск №3 бронетехніка України: бойові модулі України» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://web.archive.org/web/20161018201327/https://www.erepublik.com/ru/article/-3-5-2542149/1/20>
- [8] - ІНГУЛ (INGUL) [Електронний ресурс]. Доступно: [http://eragun.org.ua/heavy-armor/bm\\_ingul.html](http://eragun.org.ua/heavy-armor/bm_ingul.html)
- [9] - Київський Завод Автоматики «Стабілізатор озброєння 2Е36-І» [Електронний ресурс]. Доступно: [http://www.kza.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=99&Itemid=167](http://www.kza.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=99&Itemid=167)
- [10] - Безвесільна О.М. Таланчук П.М. «Стабілізатор озброєння для броньованої техніки. На здобуття Державної премії України» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://kpi.ua/1621-2>

					<i>ДПБ.ІІМ-91.15.1760.001.ІІЗ</i>	Арк.
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

- [11] - Київський Завод Автоматики «Стабілізатор озброєння СВУ-500» [Електронний ресурс]. Доступно: [http://kza.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=91&Itemid=100](http://kza.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=91&Itemid=100)
- [12] - «Стабілізатор СВУ-500-7Ц підвищеної точності» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://glavcom.blogspot.com/2020/06/>
- [13] - ТОВ UNIT «СУВ SINTEZ» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://unit.com.ua/wp-content/uploads/2019/10/SINTEZ.pdf>
- [14] - П'єзоелектричні матеріали [Електронний ресурс]. Доступно: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3200.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3200.html)
- [15] - О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Н.М. Назаренко. «Перетворювачі механічних величин в електричні»
- [16] - Ю. М. Поплавко Ю. І. Якименко «П'єзоелектрики» Навчальний посібник Київ НТУУ «КПІ» 2013 [Електронний ресурс]. Доступно: [https://me.kpi.ua/downloads/Poplavko\\_Piezoelectrics\\_2013.pdf](https://me.kpi.ua/downloads/Poplavko_Piezoelectrics_2013.pdf)
- [17] - «Перетворювачі на основі п'єзоактивних матеріалів» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/akusticheskie-izmereniya-v-yadernoy-energetike-6.html>
- [18] - КМТ КИЇВ «Таблиця фізичних та електричних властивостей п'єзокерамічних матеріалів» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://kmt.kiev.ua/products/oltano/>
- [19] - КМТ КИЇВ «Таблиця фізичних та електричних властивостей п'єзокерамічних матеріалів» [Електронний ресурс]. Доступно: <http://kmt.kiev.ua/products/piezoceram/>
- [20] - Steve Hanly «Piezoelectric Accelerometers: Mysteries On How They Work... Revealed!» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://blog.endaq.com/piezoelectric-accelerometers-how-they-work-and-where-to-buy>
- [21] - Engineer\_Ambitiously. «Measuring Vibration with Accelerometers» [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.ni.com/en-us/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-vibration-with-accelerometers.html>