

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

Приладобудівний

(назва факультету, інституту)

Приладів і систем орієнтації та навігації

(назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код та назва спеціальності)

на тему: «Автоматизація автономного стенду для інженерних досліджень

сейсмодатчиків»

**Виконав:** студент VI курсу, групи ПГ-81мп

(шифр групи)

Палій Олександр Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

**Науковий керівник:** доц., к.т.н. Мироненко П. С.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

**Консультант з:** Розробка стартап-проекту

(назва розділу)

доц., д.е.н. Бояринова К. О.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

**Рецензент:** асистент, к.т.н. Івасенко В.М.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Київ – 2019

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

Факультет \_\_\_\_\_ Приладобудівний \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Приладів і систем орієнтації та навігації \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціалізація 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Н.І.Бурау  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

\_\_\_\_\_ Палію Олександрю Максимовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Автоматизація автономного стенду для інженерних досліджень сейсмотатчиків

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ Мироненко П.С., к.т.н. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_ 10 грудня 2019 року \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження Автономний пристрій для проведення інженерних досліджень сейсмотатчиків з інформаційно – вимірювальним модулем

4. Предмет дослідження моделі та алгоритми вимірювання та реєстрації параметрів вібрації, алгоритми забезпечення динамічного діапазону випробувань сейсмотатчиків \_\_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1.) Характеристика областей застосування, типи та опис основних конструкцій сейсмотатчиків. 2) Огляд методів проведення динамічних випробувань приладів реєстрації

сейсмоколивань 3) Порівняння характеристик прототипів від лідерів ринку. 4) Розробка інформаційно-вимірювального модуля вібраційних характеристик стенду; 5) Математична модель та інженерний розрахунок основних характеристик вібростенду; 6) Фізичне моделювання розробленої системи; 7) Розробка стартап – проекту \_\_\_\_\_

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу блок-схеми, графіки модельних досліджень, демонстрація розробленої системи \_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій 1) Статті у матеріалах конференцій - 2 шт.; 2) Наукова стаття - 1шт. \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Характеристика областей застосування, типи та опис основних конструкцій сейсмодатчиків		
2.	Огляд методів проведення динамічних випробувань приладів реєстрації сейсмоколивань		
3.	Розробка інформаційно-вимірювального модуля вібраційних характеристик стенду		
4.	Дослідження математичної моделі та інженерний розрахунок основних характеристик вібростенду		
5.	Розробка стартап - проекту		

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

О.М.Палій

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

П.С.Мироненко

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Температурний, механічний, електричний та електронний стан будь-яких сейсмодатчиків з часом змінюються. Наприклад, відбуваються незворотні зміни опору котушок датчика магнітоелектричної системи вимірювання, яка призначена для генерації сейсмічного сигналу за рахунок руху маятника. Зміна характеристик датчиків відбувається також і після їх ремонту та налаштування.

Це зумовлює необхідність періодичного інженерного дослідження їх технічних станів та проведення метрологічного контролю.

Для деяких відомих сучасних моделей сейсмометрів вбудована в сам прилад спеціальна внутрішня калібрувальна апаратура.

В багатьох приладах вимірювання параметрів вібрації об'єктів такої вбудованої калібрувальної апаратури немає.

Тому для цих приладів, які багато років використовуються, необхідно проводити попереднє інженерне дослідження працездатності та тестування їх технічного стану для виявлення часових змін та перевірки їх фізичних параметрів.

**Мета роботи** – розробка стенду для оцінки динамічних характеристик сейсмодатчиків та підвищення точності контролю стану приладів систем орієнтації і навігації. Такий датчик повинен перетворювати обертальний рух валу автономного електроприводу в зворотно-поступальний рух платформи, бути універсальним для дослідження приладів як з вертикальною так і горизонтальною осями вимірювання.

**Об'єкт дослідження:** пристрій для проведення попередніх вібраційних досліджень сейсмоприймачів з системою контролю та управління динамічними випробуваннями і автономною апаратурою для цифрової реєстрації сигналів.

**Предмет дослідження:** моделі та алгоритми вимірювання та реєстрації параметрів вібрації, моделі функціонування та алгоритми забезпечення динамічного діапазону випробувань.

**Наукова новизна.** Створення методу розрахунку технічних характеристик стенду. Теоретична значимість роботи полягає у розробці методу розрахунку елементів стенду.

**Практична цінність.** Полягає в тому, що на основі аналізу конструктивно-структурних методів забезпечення надійності та точності динамічних випробувань, розроблено та виготовлено стенд і автономний реєстратор сигналів, які забезпечують підвищену надійність та інформативність в широкому діапазоні механічних збурень, захист і відновлення вимірювальної інформації при дії зовнішніх вібраційних перешкод як стаціонарного, так і нестаціонарного характеру.

**Апробація результатів.** Основні положення даної роботи та проміжні результати за темою дисертації доповідались і обговорювались на наступних конференціях:

– XII науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ.

– XV науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ.

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 3 друкованих роботи. Список наукових праць наведено в Додатку 3.

## **Структура і об'єм дисертації.**

Пояснювальна записка складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури 35 найменування і 3 додатків; викладена на 141 сторінках тексту, містить рисунки та таблиці.

**Ключові слова:** низькочастотний вібростенд, калібрування, віброшвидкість, віброприскорення, вібропереміщення.

## ABSTRACT

**Actuality of theme.** The temperature, mechanical, electrical and electronic status of any seismic sensors change over time. For example, there are irreversible changes in the resistance of the coils of the sensor of the magneto-electric measurement system, which is designed to generate a seismic signal due to the movement of the pendulum. The characteristics of the sensors also change after they have been repaired and adjusted.

This necessitates a periodic engineering study of their technical conditions and metrological control.

For some well-known modern models of seismometers special internal calibration equipment is built into the device.

Many vibration measurement devices do not have such built-in calibration equipment.

Therefore, for these devices, which have been in use for many years, it is necessary to conduct a preliminary engineering study of their performance and test their technical condition to detect temporal changes and check their physical parameters.

**The purpose of the work** – is to develop a stand to evaluate the dynamic characteristics of seismic sensors and to improve the accuracy of monitoring the orientation of navigation and navigation systems. Such a sensor should transform the rotary motion of the shaft of the autonomous electric drive into reciprocating motion of the platform, be versatile for the study of devices with both vertical and horizontal axes of measurement.

**Object of study:** a device for conducting preliminary vibration studies of seismic receivers with a system of control and control of dynamic tests and autonomous apparatus for digital signal recording.

**Subject of study:** models and algorithms for measurement and registration of vibration parameters, models of operation and algorithms for providing a dynamic range of tests.

**Scientific novelty.** Creating a method of calculating the technical characteristics of the stand. The theoretical significance of the work is to develop a method of calculating the elements of the stand.

**Practical value.** Based on the analysis of structural and structural methods to ensure the reliability and accuracy of dynamic testing, developed and manufactured stand and standalone signal registrar, which provide increased reliability and information in a wide range of mechanical perturbations, protection and restoration of measurement information under the influence of external vibration both stationary and non-stationary.

**Test results.** The main provisions of this work and the interim results on the topic of the dissertation were reported and discussed at the following conferences:

- XII Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Looking into the future of instrument making", May 15-16, 2019, KPI them. Igor Sikorsky, Kyiv.

- XV scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Efficiency of engineering decisions in instrument making", December 10-11, 2019, KPI them. Igor Sikorsky, Kyiv.

**Publications.** Three printed works have been published on the topic of the dissertation. The list of scientific works is given in Annex 3.

**The structure and scope of the thesis.** The explanatory note consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of used literature 35 titles and 3 appendices; set out on 141 pages of text, contains figures and tables.

**Keywords:** low-frequency vibration stand, calibration, vibration speed, vibration acceleration, vibration movement.



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОПРИЙМАЧІВ .....	11
1.1. Аналіз режимів роботи сучасних сейсмоприймачів.....	11
1.1.1. Види сейсмоприймачів.....	11
1.1.2. Визначення параметрів сейсмометрів .....	17
1.2. Огляд методів та засобів оцінки динамічних характеристик сейсмодатчиків.....	20
1.2.1. Методи калібрування.....	20
1.2.2. Гармонійний метод калібрування .....	22
1.2.3. Негармонійний метод калібрування .....	25
1.2.4. Імпульсний метод калібрування .....	29
1.2.5. Калібрування методом взаємності .....	31
1.2.6. Калібрування за допомогою центрифуги .....	33
1.2.7. Калібрування ударом.....	35
1.2.8. Калібрування методом порівняння .....	37
1.3. Особливості перевірки сейсмореєстраторів.....	38
1.3.1. Методи перевірки .....	38
1.3.2. Принцип роботи системи перевірки сейсмоприймачів .....	41
1.4. Мета та задача дослідження.....	42
1.5. Висновки до розділу.....	43
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ .....	44
2.1. Вибір схеми побудови стенду для оцінки динамічних характеристик сейсмоприймачів .....	44
2.2. Аналіз механічної системи стенду .....	46
2.3. Режими роботи при однокоординатному та двокоординатному вимірювання .....	52

2.4. Забезпечення динамічного діапазону коливань механічної системи .....	55
стенду.....	55
2.4.1. Математична модель випробувального вібростенду.....	55
2.4.2. Розрахунок параметрів випробувального вібростенду.....	59
2.5. Вимірювальний модуль стенду .....	60
2.6. Висновки до розділу.....	65
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТЕНДУ .....	66
3.1. Дослідження впливу зміни конфігурації системи підвісу на власні коливання стенду.....	67
3.2. Експериментальне дослідження роботи стенду .....	78
3.2.1. Вертикальна вісь вимірювання .....	78
3.2.2. Горизонтальна вісь вимірювання.....	84
3.3. Висновки до розділу.....	90
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ СТЕНД ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОПРИЙМАЧІВ» .....	91
4.1. Опис ідеї проекту .....	91
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	95
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	97
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	106
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	109
4.6. Висновки до розділу.....	113
ВИСНОВКИ .....	115
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	116
Додаток 1 .....	120
Додаток 2 .....	121
Додаток 3 .....	127

## ВСТУП

В багатьох сучасних системах не зменшується (а подекуди і збільшується) інтерес до використання сеймоприймачів та інших високочутливих вібровимірювальних перетворювачів. Вони використовуються при побудові охоронних систем на територіях великих периметрів, для моніторингу сейсмічної активності, для захисту нафтогазових комунікацій. Також сеймоприймачі знайшли своє використання в системах діагностики і моніторингу технічного стану конструкцій, споруд, будівель і мостів [20], [32].

В сучасних системах вібраційних випробувань таких датчиків використовують як різні методики, так і різні пристрої (універсальні, спеціальні). Як правило, часто змінюються при цьому і умови проведення досліджень (стаціонарні, польові) [32].

Використання універсальних високоточних стендів, які часто мають надлишкові для таких випробувань характеристики, в багатьох випадках недоцільно. В той же час спеціалізоване обладнання, спроектоване для виконання конкретних досліджень, для конкретних умов експлуатації, як правило, більш зручне, ніж універсальне, і економічно більш вигідніше [32].

Вибір кінематичної схеми стенда, проектування і дослідження характеристик його електромеханічної системи здійснювався на основі аналізу режимів роботи інерціальних датчиків та огляду існуючих засобів оцінки їх динамічних характеристик [8],[33].

На відміну від [25], в якій описано стенд, що функціонує в режимі згасаючих коливань, даний пристрій функціонує в режимі вимушених коливань [32].

**Актуальність теми.** Температурний, механічний, електричний та електронний стан будь-яких сейсмодатчиків з часом змінюються. В першу чергу

відбуваються незворотні зміни опору котушок датчика магнітоелектричної системи вимірювання, яка призначена для генерації сейсмічного сигналу за рахунок руху маятника. Зміна характеристик датчиків відбувається також і після їх ремонту та налаштування.

Це зумовлює необхідність періодичного інженерного дослідження їх технічного стану та проведення метрологічного контролю.

Для деяких відомих сучасних моделях сейсмометрів вбудована в сам вимірювач спеціальна внутрішня калібрувальна апаратура.

Але в багатьох приладах вимірювання параметрів вібрації об'єктів такої вбудованої калібрувальної апаратури немає.

Тому для цих приладів, які багато років використовуються, необхідно проводити попереднє інженерне дослідження працездатності та тестування їх технічного стану для виявлення часових змін і перевірки їх основних метрологічних параметрів.

**Мета роботи** - розробка стенду для оцінки динамічних характеристик сейсмодатчиків та підвищення точності контролю стану приладів систем орієнтації і навігації. Такий датчик повинен перетворювати обертальний рух валу автономного електроприводу в зворотно-поступальний рух платформи, бути універсальним для дослідження приладів як з вертикальною так і горизонтальною осями вимірювання.

**Об'єкт дослідження** - пристрій для проведення попередніх вібраційних досліджень сейсмоприймачів з системою контролю та управління динамічними випробуваннями і автономною апаратурою для цифрової реєстрації сигналів.

**Предмет дослідження** - моделі та алгоритми вимірювання та реєстрації параметрів вібрації, моделі функціонування та алгоритми забезпечення динамічного діапазону випробувань.

**Наукова новизна** - створення методу розрахунку основних технічних характеристик елементів підвісу стенду.

**Практична цінність.** Полягає в тому, що на основі аналізу конструктивно-структурних методів забезпечення надійності та точності динамічних випробувань, розроблено та виготовлено стенд і автономний реєстратор сигналів, які забезпечують підвищену надійність та інформативність в широкому діапазоні механічних збурень, захист і відновлення вимірювальної інформації при дії зовнішніх вібраційних перешкод як стаціонарного, так і нестаціонарного характеру.

## **РОЗДІЛ 1.**

### **ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОПРИЙМАЧІВ**

#### **1.1. Аналіз режимів роботи сучасних сейсмоприймачів**

##### **1.1.1. Види сейсмоприймачів**

Сейсмоприймач це датчик, який являється ланкою первинного обробітку інформації реєстраційного каналу в сейсмозвідці. Це апарат, що складається з механічної та електричної частини, який сприймає механічні коливання ґрунту і перетворює їх в електричні коливання [1].

Існує велика кількість типів приймачів механічних коливань ґрунту, які відрізняються за:

- вимірюваними параметрами коливань;
- фізичними явищами, що закладені в основу перетворення механічних коливань в електричні;
- характером застосування.

За фізичними явищами, закладеними в основу перетворення механічних коливань в електричні, розрізняють такі сейсмоприймачі [2]:

- приймачі з індукційним електромагнітним або електродинамічним перетворенням;
- п'єзоелектричні приймачі;
- тензодатчики опору;
- частотні.

Приймач з індукційним перетворювачем складається з тонкої котушки, що підвішена на пружині в полі постійного магніту, пов'язаного з корпусом

сейсмоприймача. Котушка рухається з відставанням від руху корпусу приладу завдяки дії сили інерції на чутливий елемент [4]. Для зниження часу власних коливань приймача в системі приладу вбудовується система загасання [1].

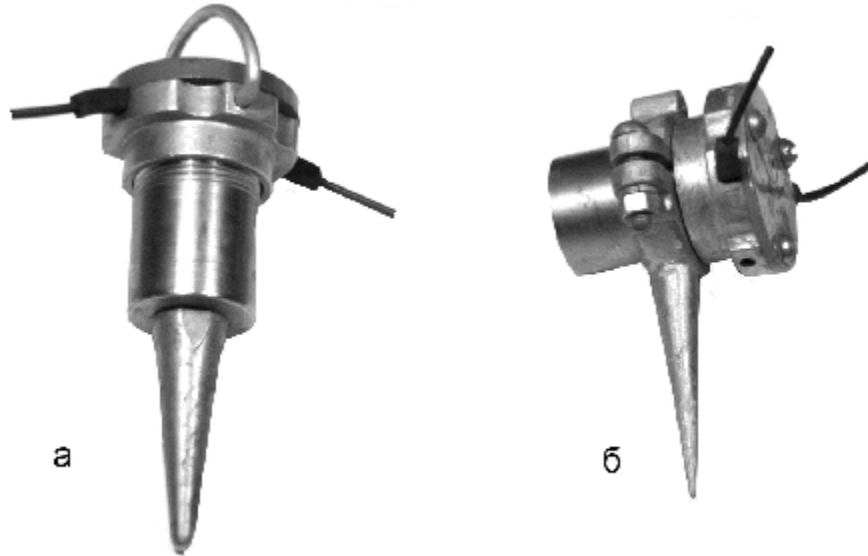


Рис.1.1. Зовнішній вигляд сейсмоприймача з електродинамічним перетворенням

а - вертикальний; б – горизонтальний

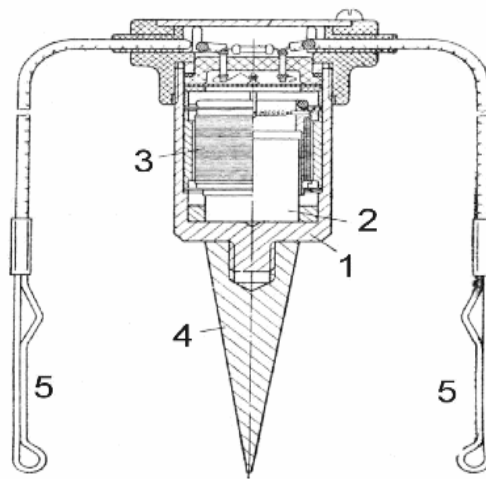


Рис.1.2. Пристрій вертикального сейсмоприймача

1 - корпус; 2 -магніт; 3 - котушка; 4 - штир; 5 - клеми.

Інертна маса з'єднана з корпусом сейсмоприймача за допомогою однієї або декількох пружин і переміщується відносно його корпусу. Коли корпус сейсмоприймача встановлюють на поверхню Землі, він здійснює коливання разом з ґрунтом, а інертна маса переміщується щодо корпусу внаслідок дії сили інерції. Для створення змінної електричної напруги використовують відносні переміщення інертної маси. В якості інертної маси в індукційному електромагнітному приймачі використовують постійний магніт, який підвішений на пружині до корпусу, на якому нерухомо закріплена котушка.

У сейсмоприймачах з електродинамічним перетворювачем в якості інертної маси використовується котушка, яка переміщується в магнітному полі постійних магнітів, нерухомо закріплених в корпусі сейсмоприймача [2].

У п'єзоелектричних приймачах на виході пристрою з'являється напруга, яка залежить від тиску, що чинить інертна маса на чутливий елемент – кристал п'єзокварцу [4].

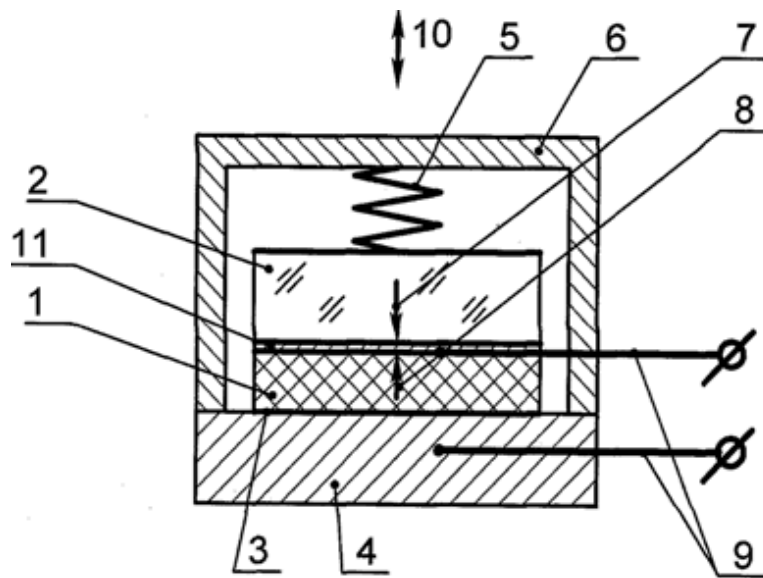


Рис.1.3. Пристрій п'єзоелектричного сейсмоприймача

На наведеному рис.1.3 зображена конструктивна схема п'єзоелектричного акселерометра.



П'єзоелектричний акселерометр містить п'єзочутливий елемент 1 і інерційний елемент 2, стиснуті до основи 3 корпусу 4 за допомогою пружного елемента 5, наприклад, пружини. П'єзочутливий елемент 1 виконаний з п'єзокерамічного матеріалу - титанату натрію вісмуту. Інерційний елемент 2 виконаний з монокристалічного діелектрика - п'єзоелектричного матеріалу, наприклад, кварцу.

Вектори поляризації 7 і 8, відповідно інерційного елемента 2 і п'єзочутливого елемента 1, орієнтовані вздовж осі чутливості 10 акселерометра і спрямовані в різні боки.

Електроди (виділені основними лініями) зазначених елементів з'єднані електрично паралельно. За допомогою струмознімача 11, встановленого між п'єзочутливим 1 і інерційним 2 елементами, забезпечується електричне з'єднання першої пари електродів, а за допомогою пружини 5 і кришки 6 – з'єднання другої пари електродів. При цьому корпус 4 і кришка 6 виконані з струмопровідного матеріалу. За допомогою виводів струму 9 здійснюється електричне зняття сигналу.

Дія п'єзоелектричного сейсмоприймача заснована на явищі п'єзоефекту – властивостях деяких кристалічних речовин створювати електричні заряди під дією механічної сили. П'єзоефект спостерігається в кристалах кварцу, турмаліну, сегнетової солі, титанату барію та деяких інших речовин. В момент прикладання сили миттєво з'являється заряд, що робить п'єзоелектричні приймачі незамінними при вимірюванні швидкоплинних процесів. Для виготовлення п'єзоелектричних чутливих елементів найбільш широко застосовується кварц, який має високу механічну міцність, хороші п'єзоелектричні та ізоляційні властивості, а також має однакові характеристики при зміні температури у великому діапазоні.

Тензодатчик опору це первинний прилад, за допомогою якого проводяться вимірювання відносних деформацій різних конструкцій та конструктивних елементів при навантаженні або впливі температури, принцип дії яких, заснований на визначенні зміщення (або переміщення) пружного елемента.

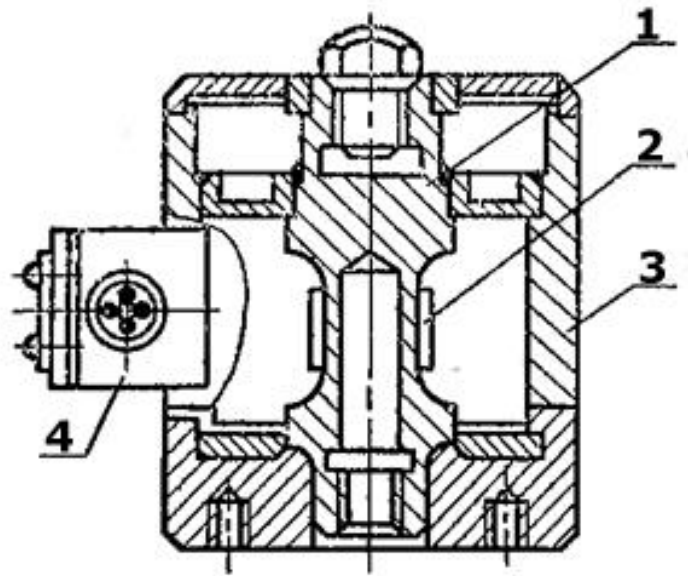


Рис.1.4. Конструкція тензодатчика опору

На рис.1.4 показано конструкцію тензодатчика опору, який складається з:

1. Пружного елемента, що сприймає навантаження, виготовляється для отримання стабільних характеристик, з попередньо термооброблених легованих вуглецевих сталей. Конструктивно може бути виготовлений у вигляді стрижня, кільця, тіла обертання. Широке поширення набули конструкції у вигляді стрижня (або декількох стрижнів);
2. Тензорезистор - фольговий або дротяний резистор, приклеєний до пружного елемента (стрижень), що змінює свій опір пропорційно деформації пружного елемента, який в свою чергу пропорційний навантаженню;

3. Корпус датчика - призначений для захисту пружного елемента і тензорезистора від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища. Має різне виконання відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96);
4. Герметичний вхід – призначений для підключення тензодатчика до вторинного приладу (ваговий індикатор, електронний підсилювач, АЦП) за допомогою кабелю. Можливі варіанти підключення по 6-ти і 4-х провідної схеми.

Датчики опору можуть вимірювати як лінійний зсув (при поступальному русі), так і кут повороту (при обертанні). Найбільш поширені тензодатчики опору одноразового використання – тензодатчики опору знімного типу, що допускають багаторазове застосування. Найпростішим тензодатчиком опору одноразового використання є лінійний провідник з тензочутливого сплаву, наклеєний на досліджувану поверхню і включений в електричний ланцюг разом з вторинним реєструючим приладом. Тензодатчики опору являють собою пружний елемент, на якому кріпиться тензорезистор. Деформація пружного елемента під дією сили відбувається разом з тензорезистором. Ступінь деформації обчислюють за зміною опору тензорезистора, яка пропорційна силі, що прикладена до конструкції [3].

### 1.1.2. Визначення параметрів сейсмометрів

1. Момент інерції  $K_s$  і приведена довжина  $l_s$ . Для цього проводяться виміри періоду вільних коливань маятника відносно штатної осі –  $T_{sm}$  та зміщення осі –  $T'_{sm}$ . В кожному випадку маятник легким поштовхом відхиляється на невеликий кут ( $\sim 10^\circ$ ) і секундоміром вимірюють час  $t_{100}$  – 100 повних коливань. Період знаходиться за формулою  $T_{sm} = t_{100}/100$ . Для розрахунку використовуються такі формули [24]:

$$l_s = \frac{g}{4\pi^2} \cdot T_{sm}^2 \quad (1)$$

$$l'_s = \frac{g}{4\pi^2} \cdot T_{sm}'^2 \quad (2)$$

$$K_s = M \cdot \Delta R_0 \cdot l_s \frac{l'_s - \Delta R_0}{l_s - l'_s + 2\Delta R_0}, \quad (3)$$

де  $M$  – маса маятника з ножами,  $\Delta R_0$  – відстань між лезами ножової опори.

2. Активний опір котушок сейсмометра вимірюється за допомогою моста змінного струму, а при його відсутності – тестером.

3. Період власних коливань сейсмометра  $T_s$  визначається при розімкнутих котушках. Легким поштовхом виводимо маятник сейсмометра із стану рівноваги та вимірюємо час 10 повних коливань  $t_{10}$ , період розраховується за формулою  $T_s = t_{10}/10$ .

4. Коефіцієнт перетворення (чутливість) робочої  $S_{sg}$ , демпфуючої  $S_{sd}$  та калібруючої  $S_{sk}$  котушок сейсмометра визначається наступним чином: котушки по черзі включаються в схему (див. рис.1.5), де А - міліамперметр, РР – магазин опорів. У спеціальне місце на маятнику на відстані  $r_0 = 0,14$  м від осі підвісу маятника розміщено вантаж масою  $m$  кг, маятник під впливом ваги вантажу опускається.

Для повернення маятника в початкове становище в котушку подається струм  $i$ , який регулюється магазином опорів. Коли горизонтальна світлова лінія співпадає з вихідним положенням, робиться відлік струму по міліамперметру.

Коефіцієнт перетворення розраховується за формулою:

$$S = \frac{gmr_0}{il_s} \quad (4)$$

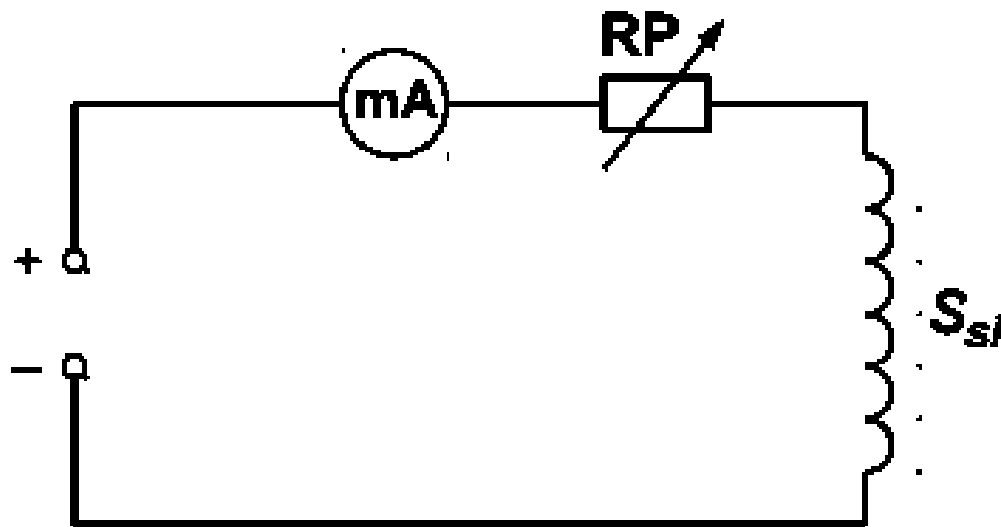


Рис.1.5. Схема підключення катушки

5. Загасання сейсмометра  $D$  визначається наступним чином: маятник легким поштовхом або слабким електричним імпульсом, поданим в котушку загасання, виводиться з положення рівноваги і проводиться запис затухаючих коливань. Далі, вимірюються амплітуди коливань на осцилограмі із зсувом на половину періоду вільних коливань:

$$A_0 = A(t_0), A_1 = A\left(t_0 + \frac{T_s}{2}\right), \dots, A_n = A\left(t_0 + n \frac{T_s}{2}\right) \quad (5)$$

Загасання розраховується за формулою:

$$D = \frac{\ln(A_n/A_{n+1})}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(A_n/A_{n+1})}} \quad (6)$$

Оптимальному загасанню  $D = 0,707$ , відповідає відношення  $A/A_{n+1} = 23$ .

Розрахунок опору загасання  $R_d$  виконується за формулою:

$$R_d = \frac{S_{sd}^2 l_s^2}{4\pi K_s f_0} - R_{sd} \quad (7)$$

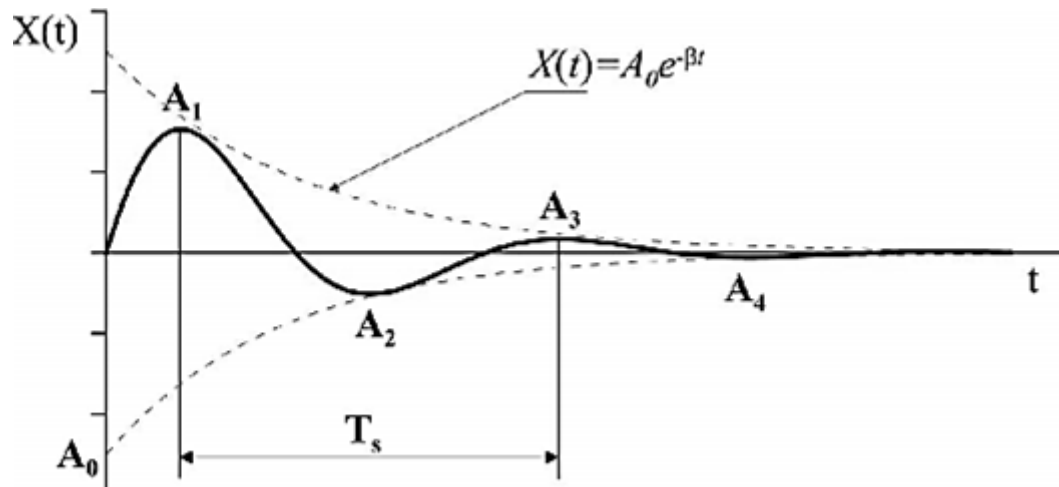


Рис.1.6. Перехідна характеристика

## 1.2. Огляд методів та засобів оцінки динамічних характеристик сейсмодатчиків

### 1.2.1. Методи калібрування

Оцінку динамічних характеристик сейсмодатчиків розділяють на повну і частинну. Повна оцінка динамічних характеристик визначає зміну вихідного сигналу засобу вимірювань при будь-якій зміні з часом інформативного параметру вхідного сигналу або впливаючої величини. Частинна оцінка динамічної характеристики представляє собою оцінку окремого параметру або функціоналу повної динамічної характеристики параметра вимірювань [11].

До повної характеристики відносять диференційне рівняння, імпульсну характеристику, перехідну характеристику, передатну функцію и сукупність амплітудно- та фазочастотних характеристик.

До частинної характеристики відносять окремі параметри повних динамічних характеристик і характеристики, що не повністю відображають динамічні властивості засобів вимірювань, але необхідні для проведення вимірювань із заданою точністю.

Сукупність амплітудно-частотної (АЧХ) та фазо-частотної характеристик (ФЧХ) дає можливість одержати достатньо точну оцінку швидкодії сейсмоприймача для визначення його придатності для вирішення конкретних задач.

Амплітудно-частотною характеристикою сейсмоприймача називають залежність відношення між напруженою електричною сигналом на виході приймача  $A_1$  і амплітудою механічних коливань на вході від частоти  $A_0$  [12]:

$$K_c(f) = \frac{A_1(f)}{A_0(f)} = \frac{\rho^2}{\sqrt{(1 - \rho^2)^2 + 4b^2\rho^2}}, \quad (8)$$

де  $\rho = \frac{f}{f_0}$ .

Фазо-частотною характеристикою називають частотну залежність фазового зсуву електричним імпульсом на його виході  $\varphi_1(\omega)$  і коливаннями корпусу приймача на виході  $\varphi_0(\omega)$  [12]:

$$\gamma_c(f) = \varphi_1(f) - \varphi_0(f) = \arctg \frac{-2b\rho}{1 - \rho^2}, \quad (9)$$

Сеймоприймач представляє собою мінімально-фазову систему, тобто ФЧХ однозначно залежить від АЧХ. Вираження (8, 9) цих характеристик залежать від трьох динамічних параметрів, а саме:

- власна частота;
- коефіцієнт демпфування;
- чутливість.

При визначенні повної характеристики на вхід засобу вимірювання подається сигнал, що дозволяє на виході одержати шукану характеристику.

Для коректної оцінки АЧХ, на вхід сейсмодатчика подають лінійне прискорення з фіксованою амплітудою в заданому діапазоні частот. Саме для цього використовують вібростенд, який дає змогу відтворювати лінійні прискорення в заданому діапазоні частот.

Для калібрування сейсмодатчиків частіше використовують вібростенди електродинамічного типу.

Існують такі методи калібрування сейсмодатчиків:

- гармонійний;
- негармонійний;
- імпульсний.



### 1.2.2. Гармонійний метод калібрування

Одним із гармонійних методів калібрування сейсмодатчиків є генераторний. Запропонований спосіб калібрування полягає в тому, що штучно збуджують коливання маятника калібруючого сейсмодатчика і знімають показання з регістра, на підставі яких складається характеристика сейсмодатчика - АЧХ сейсмографа. При цьому силу збудження прикладають до станини сейсмографа за допомогою постаменту вібруючого електрострикційного матеріалу, на протилежних сторонах якого розміщені обкладки конденсатора. Частоту коливання електрострикційного матеріалу задають шляхом збудження заданого значення електричного поля даного конденсатора, а АЧХ сейсмодатчика визначають на підставі заданих значень частоти коливань електрострикційного матеріалу і відомої величини його лінійної деформації [13].

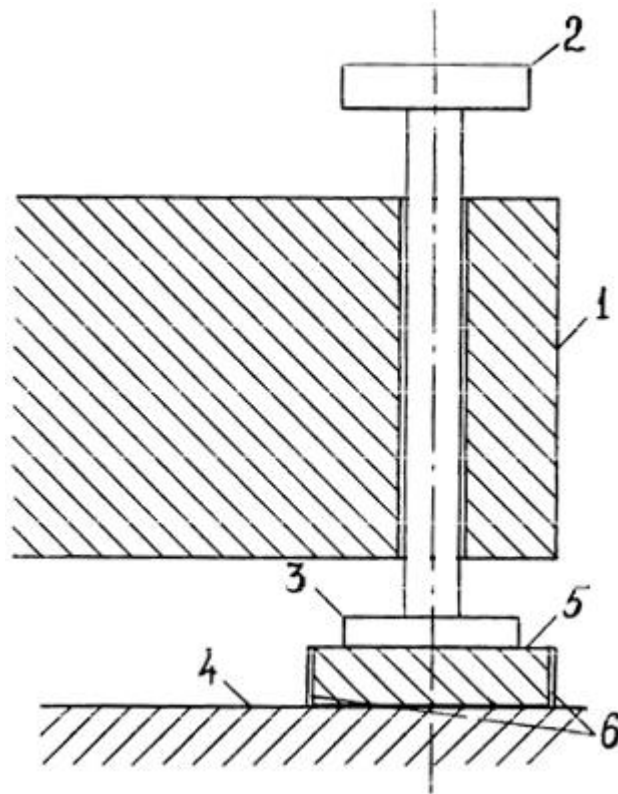


Рис.1.7. Генераторний метод калібрування

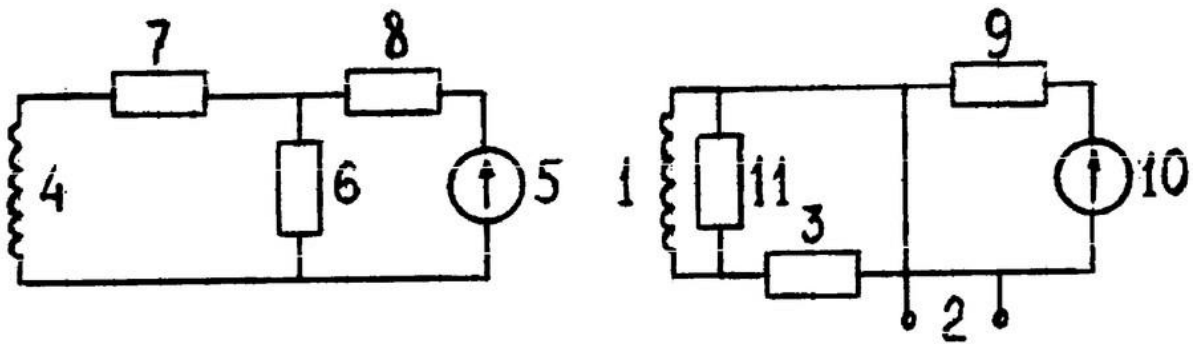


Рис.1.8. Принципова схема

Широко поширений генераторний метод калібрування сейсмічного каналу, в якому прикладають силу збудження не до станини сейсмометра, а до рухомої маси, здійснюючи так зване силове збудження. В цьому випадку необхідно знайти співвідношення між прикладеною силою і відповідним фіктивним зміщенням станини сейсмометра. Принципова схема генераторного способу калібрування наведена на рис.1.8. Фіктивне прискорення основи сейсмометра поступального типу при силовому збудженні дорівнює відношенню прикладеної сили до інертної маси, при цьому силове зміщення маятника сейсмометра, що має електромеханічний перетворювач, проводиться генератором електричних коливань (наприклад, синусоїдального струму), який включається або на котушку загасання, або на котушку калібрування. До однієї з котушок сейсмометра (наприклад, демпфуючої) 1 підключається генератор низької частоти 2, і між генератором і сейсмометром включається великий розв'язуючий опір 3 для того, щоб загасання сейсмометра не змінилося. Величину сигналу генератора підбирають такою, щоб на записах отримати амплітуди, які можна прочитати, а, знаючи амплітудне значення сигналу генератора на конкретному періоді і величині включених опорів в ланцюзі (робочої котушки сейсмометра 4, рамки гальванометра 5, шунтуючого опору 6, додаткових опорів 7, 8, 9, опорного гальванометра 10, зовнішнього опору демпфуючої котушки 11), визначаємо значення сили струму. По величині струму, а також за даними котушки

сейсмометра визначаємо величину фіктивного зміщення станини сейсмометра а [14, 15].

Недоліком даного способу є те, що сила збудження прикладається до рухомої маси, а не до станини (основи), внаслідок чого отримуємо фіктивне прискорення основи сейсмометра, а не реальне. Крім того, при переході від прискорення до величини самого зсуву доводиться застосовувати двократне інтегрування, що призводить до додаткових помилок. З цих причин точність визначення частотної характеристики сейсмографа невисока і форма амплітудно-частотної характеристики в повному обсязі не відповідає дійсності.

Технічний результат в пропонованому способі, зображеному на рис.1.7, досягається тим, що збуджуюча станину 1 сила докладається безпосередньо до станини через регулюючі гвинти 2 шляхом введення між під'ятниками гвинтів 3 і постаментом 4 електрострикційного матеріалу 5. Даний матеріал являє собою твердий діелектрик, який деформується в певному лінійному напрямку (для вертикальних сейсмометрів - в вертикальному, для горизонтальних - в горизонтальному) під час прикладання до нього електричного поля. Знак електрострикційних деформації (тобто розширюється або стискається зразок діелектрика під дією поля) від напрямку поля не залежить і в змінному електричному полі частоти  $f$  діелектрик деформується з частотою  $2f$ . Електричне поле можна створити, наприклад, за допомогою двох обкладок конденсатора 6, розташованих у протилежних сторонах електрострикційного матеріалу 5. Керуючи зарядкою-розрядкою конденсатора 6, можна добитися необхідного вібраційного ефекту електрострикційних матеріалу 5, коливання якого природно передадуться станині сейсмометра. Переваги електрострикційних перетворювачів складаються у високій чутливості, високій точності механічного переміщення, рівномірної частотної характеристики і низького рівня власного шуму, а також в малій температурній залежності властивостей (чутливості,

резонансної частоти, електричного імпедансу і т.д.). Крім того, амплітуда і частота коливань електрострикційного матеріалу 5 відповідають величинам реальних сейсмічних коливань ґрунту. Ставлячи за допомогою електричного поля конденсатора 6 частоту коливань матеріалу 5 і, знаючи з паспортних даних величину його лінійної деформації, знімаються показання з реєстра і по них складається АЧХ.

### 1.2.3. Негармонійний метод калібрування

Одним із негармонійних методів калібрування сейсmodатчиків є метод калібрування ступеню зміщення. Даний метод заснований на механічному впливі на корпус датчика. Перевага методу полягає в тому, що для отримання повної частотної характеристики датчика потрібно всього один простий тестовий вплив, який легко вимірюються в абсолютних фізичних одиницях, і заміняє безліч гармонійних коливань, кожне з яких вимагало б окремого виміру [16].

Як відомо [18], будь-яка лінійна динамічна система  $B(j\omega)$  характеризується не тільки комплексною частотною характеристикою (КЧХ) [19], а й імпульсною перехідною функцією (ІПФ)  $b(t)$ , яка являє собою теоретичну реакцію даної системи на дельта-функцію і однозначно пов'язана з КЧХ зворотним перетворенням Фур'є [16]:

$$b(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} B(j\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (10)$$

$$B(j\omega) = \int_0^{\infty} b(t) e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

КЧХ  $B(j\omega)$  і АЧХ  $|B(j\omega)|$  можна отримати, маючи експериментальний запис системи на тестовий імпульс, отриманий в результаті експерименту, якість якого визначається шириною його амплітудного спектру. Для калібрування

сейсмодатчика по швидкості задається тестовий вплив у вигляді дельта-функції швидкості, що створюється шляхом різкого зсуву корпусу датчика на задану фіксовану величину  $h$ . Ідеалізовано таке зміщення  $x(t)$  можна відобразити формулою:

$$x_h(t) = h \cdot l_s(t), \quad (12)$$

де  $l_s(t)$  – одинична ступінчаста функція Хевісайда. Похідна від (12) пропорційна дельта-функції і висоті ступені  $h$ :

$$x'_h(t) = \frac{d(x_h(t))}{dt} = h \left( \frac{d(l_s(t))}{dt} \right) = h\delta_v(t), \quad (13)$$

Якщо вплив на датчик буде миттєвим, а саме зміщення корпусу на відстань  $h$ , то це зміщення буде рівноцінним впливу за швидкістю у вигляді дельта-функції швидкості з амплітудою  $h$  [17]. Реакція датчика на такий ідеальний вплив пропорційна перехідній функції по швидкості.

При недосконалому, але відомому імпульсному впливі  $x'_h(t)$  використовують загальні формули:

$$W_{VV}(i\omega) = \frac{Y_h(i\omega)}{X_h(i\omega)}, \quad \text{де} \quad (14)$$

$$X_h(i\omega) = \int_0^{\infty} x'_h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (15)$$

Функція (14) існує при всіх  $\omega$ , при яких  $|X_h(i\omega)| > 0$ .

На нульовій частоті рівняння (15):

$$X_h(0) = \int_0^{\infty} x'_h(t) dt = h \quad (16)$$

З рівняння (15) бачимо, що на нульовій частоті повністю відсутня  $x'_h(t)$  і може з'явитися тільки з збільшенням частоти, що дає змогу обрахувати АЧХ (15), використовуючи нормований безрозмірний спектр  $X_0(\omega)$ :

$$W_{VV}(\omega) = \frac{Y_h(\omega)}{hX_0(\omega)}, \quad \text{де} \quad (17)$$

$$X_0(\omega) = \frac{X_h(\omega)}{X_h(0)} = \frac{X_h(\omega)}{h} \quad (18)$$

Частотна характеристика сейсмодатчика дорівнює розмірному спектру його реакції на ступінь зміщення.

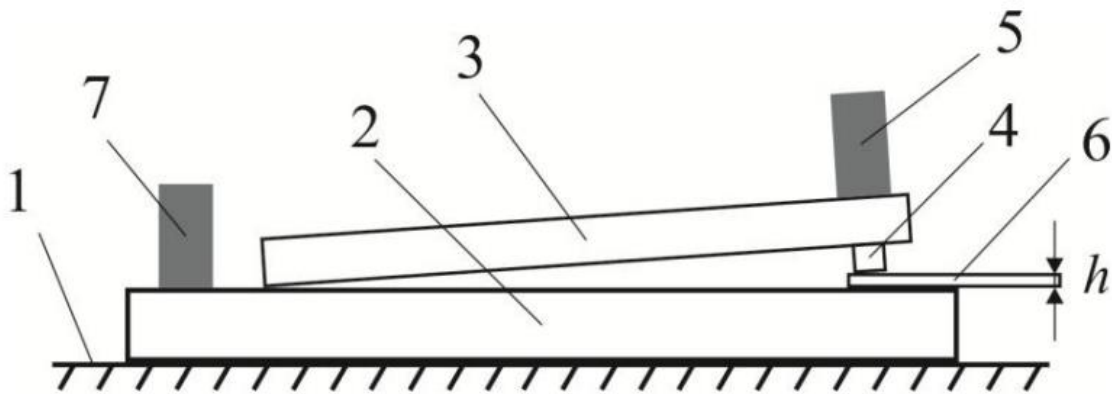


Рис.1.9. Принципова схема калібрувального стенду:

1 - фундамент, 2 - станина, 3 - рухома платформа, 4 - упор, 5 - тестовий датчик, 6 - калібрований щуп, 7 - компенсуючий датчик

На рис.1.9 схематично зображено калібрувальний стенд, який використовується при даному методі калібрування.

На жорсткому фундаменті (1) встановлена нерухома металева станина (2), що має плоску гладку верхню поверхню. На станину покладена рухома платформа (3), що має форму паралелепіпеда, на нижній площині якої поблизу

середини одного з ребер укріплений точковий упор(4). Зверху на платформі приблизно над упором встановлюється тестований датчик (5). При такій конструкції платформа буде спиратися на площину станини лінією (ребром, протилежним упору) і точкою (упором). Якщо під упор підставити плоску пластину-щуп (6) відомої товщини  $h$ , то край платформи, на якому укріплений тестований датчик, підніметься на товщину цього щупа. Якщо щуп висмикнути, то платформа з датчиком під дією сили тяжіння впаде на станину і прийме початкове положення. Внаслідок, датчик різко зміститься практично точно на товщину щупа.

На практиці реальний вплив буде спотворено в першу чергу власними коливаннями станини і зовнішніми сейсмічними шумами. Крім того вільне падіння платформи з датчиком відбудеться не миттєво, а займе час, що призведе до відхилення тестового впливу від дельта-функції і, як в наслідок, подальшого "завалу" верхніх частот спектру калібруючого відгуку датчика. Також при ударі упору об станину можливі відскоки.

Усунення всіх вищезазначених спотворень може бути досягнута двома додатковими операціями. Перша полягає у вимірюванні за допомогою компенсаційного датчика і відніманні з відгуку калібруючого датчика коливань станини. Друга полягає у прямому записі «істинної» відносної швидкості платформи і станини в момент тестового стрибка спеціальним датчиком.

#### 1.2.4. Імпульсний метод калібрування

Під час імпульсного методу калібрування на сейсмодатчик подається вхідний сигнал у вигляді прямокутного імпульсу різної амплітуди.

Спочатку перед калібруванням сейсмометра проводиться попередня робота по обчисленню коефіцієнтів для перетворення цифрових одиниць АЦП в зміщення, вимірюваних в мікронах. Коефіцієнти враховуються окремо для кожного каналу, константи поправки необхідні при розрахунках в кожен момент роботи кожного з сейсмометрів, який підключається до будь-якого з каналів.

Значення коефіцієнтів перетворень одиниць АЦП обчислюють для кожного каналу станції окремо шляхом проведення процедури стандартних метрологічних процесів, представлених у вигляді подачі прямокутного вхідного сигналу певної амплітуди на кожен канал окремо.

Експериментальний процес [20] показав, що є лінійна пряма залежність значень одиниць АЦП каналу, підключеної до сейсмометрів, від вхідного прямокутного сигналу в мікронах.

Для перевірки роботи основної вимірювальної частини самого каліброваного пристрою проводять випробувальні вимірювання вхідних зсувів і відгуків на них іншого сейсмометра. Для цього використовується програмне забезпечення (ПО), що забезпечує процеси обчислення значень прискорення, швидкості і зміщення в будь-який момент запису. Якщо провести простий аналіз розкиду значень помилки і її середнього значення, ми побачимо, що для більш точних результатів необхідно використовувати статистичні класичні методи обчислень.

Крім вимірювань реальних зсувів за допомогою пристроїв, які фіксують цей процес як вхідний сигнал для будь-якого сейсмометра або сейсмостанції, даний



метод для калібрування дозволяє за рахунок використання вхідного сигналу у вигляді прямокутного імпульсу здійснювати обчислення АЧХ одноразово. Існує досить багато публікацій [21, 22, 23], в яких представлені результати різних методів калібрування, в тому числі отримані аналогічним способом, з добре описаними математичними методами обчислень передавальних функцій сейсмометрів на основі використання нулів і полюсів.

У цих роботах описано, чому використання вхідного сигналу у вигляді прямокутного імпульсу в процесі калібрування для будь-якої сеймостанції дозволяє в допустимих межах точності за досить короткий період однократного процесу вимірювань отримувати поканальні цифрові значення записів, за допомогою яких можна обчислити передавальну функцію даного пристрою.

### 1.2.5. Калібрування методом взаємності

Первинне калібрування можна провести методом взаємності, якщо вихідний електричний сигнал прямо пропорційний вібрації, яку створює вібростенд. Принцип взаємності для котушки збудження вібростенду полягає в тому, що відношення сили, що діє на рухому платформу вібростенду, до створюваної при цьому різниці потенціалів в розімкненому ланцюзі котушки збудження вібростенду дорівнює відношенню сили струму в котушці збудження до швидкості коливань, що створює рухома платформа вібростенду [27].

При збудженні вібростенду змінним струмом певної частоти, який проходять по котушці збудження, коефіцієнт перетворення  $S_{uc}$  знаходиться за формулою:

$$S_{uc} = \frac{u_{13}}{\hat{a}} = \left[ \frac{B}{M/c^2} \right], \quad (19)$$

де  $u_{13}$  – різниця потенціалів на виході перетворювача

$\hat{a}$  – прискорення.

Метою калібрування методом взаємності є визначення коефіцієнта перетворення  $S_{uc}$ , для того щоб по результатах вимірювання різниці потенціалів  $u_{13}$  можна було б розрахувати прискорення за формулою (19).  $S_{uc}$  знаходиться за формулою:

$$S_{uc} = S_0 + s_z Z_m, \quad (20)$$

де  $Z_m$  – вхідний механічний імпеданс перетворювача, кг/с

значення величин  $S_0$  і  $s_z$  визначають за результатами двох експериментів і подальшого розрахунку [27].

1. На рухому платформу вібростенду послідовно встановлюють кілька вантажів. Визначають передавальний повну провідність  $Y_e$ , між силою струму  $i$  у котушці збудження і різницею потенціалів на виході акселерометра  $u_{13}$ , при збудженні кожного вантажу, а також при роботі вібростенду без вантажу за формулою:

$$Y_e = \frac{i}{u_{13}} = \left[ \frac{A}{B} \right], \quad (21)$$

2. Рухомий елемент вібростенду з розімкненою катушкою збудження примушують здійснювати гармонічні коливання за допомогою допоміжного вібробудника. Вимірюють відношення  $u_{13}/u_{15}$  різниці потенціалів на виході перетворювача  $u_{13}$  до різниці потенціалів в розімкнутій котушці збудження вібростенда  $u_{15}$ .

3. Будують графіки залежності дійсної та уявної частин функції  $W/(Y_{eW} - Y_{e0})$  від маси вантажу  $W$ , що встановлюється на рухому платформу вібростенду, де  $Y_{eW}$  – значення передавальної повної провідності  $Y_e$  при встановленому на вібростенд вантажу  $W$ , а  $Y_{e0}$  – значення тієї ж величини, отримане без вантажу. На кожному графіку визначають точки перетину функції з віссю ординат, що утворюють, відповідно, дійсну і уявну частини комплексної величини  $J$ . Значення величин  $S_0$  і  $s_z$  визначають за формулами:

$$S_0 = \sqrt{j\omega J \left( \frac{u_{13}}{u_{15}} \right)}, \quad (22)$$

$$s_z = \sqrt{\left( \frac{u_{13}}{u_{15}} \right) / j\omega J}, \quad (23)$$

де  $\omega$  – кутова частота, рад/с;  $j$  – уявна одиниця.

### 1.2.6. Калібрування за допомогою центрифуги

За допомогою центрифуги на перетворювач прискорення можна подавати постійне прискорення з високою точністю протягом необхідного часу. Центрифуги здатні працювати з перетворювачами масою до декількох кілограмів і з прискоренням до  $6 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ . Центрифуги масового виробництва здатні створити дещо нижчі прискорення [27].

На центрифугі можна калібрувати тільки перетворювачі прискорення поступальної вібрації, що мають відгук на нульовій частоті.

Для проведення калібрування перетворювач прискорення встановлюють на столі або важелі центрифуги таким чином, щоб його вісь чутливості збігалася з радіусом окружності обертання [27]. Прискорення  $a$ , що діє на перетворювач, можна розрахувати за формулою:

$$a = \omega^2 r, \quad (24)$$

де  $\omega$  – кутова частота обертання центрифуги;

$r$  – відстань від осі обертання до центра ваги сейсмічної маси перетворювача.

Перетворювач встановлюють на такій відстані від осі обертання, щоб створюване при обертанні відхилення його сейсмічної маси було дуже малий в порівнянні із значенням  $r$ , яке визначають за результатами двох вимірювань, коли перетворювач встановлюють в різних точках з відомою відстанню між ними  $\Delta r$ . Частота обертання центрифуги повинна діяти на перетворювач однаково в різних положеннях [27].

Відстань  $r_2$  від другого перетворювача до осі обертання знаходять за формулою:

$$r_2 = \frac{\Delta r}{1 - \omega_2^2 u_1 / \omega_1^2 u_2}, \quad (25)$$

де  $\omega_1$  – кутова частота обертання центрифуги при установці перетворювача в першій точці на відстані  $r_1 = r_2 - \Delta r$  від осі обертання;

$\omega_2$  – кутова частота обертання центрифуги при установці перетворювача в другій точці на відстані  $r_2$  від осі обертання;

$u_1$  – вихідний сигнал перетворювача при кутовій частоті  $\omega_1$  ;

$u_2$  – вихідний сигнал перетворювача при кутовій частоті  $\omega_2$  .

При відомих значеннях  $r_2$  і  $\omega_2$  прискорення, що діє на перетворювач у другій точці, може бути визначено за формулою (24).

Якщо вихідний сигнал перетворювача прямо пропорційний до дійсного прискорення при його зменшенні аж до прискорення вільного падіння  $g$ , можна не вимірювати відстань  $r$ . В цьому випадку перетворювач спочатку калібрують при прискоренні, що дорівнює  $\pm g$ , за допомогою поворотної опори. Потім перетворювач поміщають на центрифугу і визначають частоту обертання  $\omega_1$ , при якій вихідний сигнал відповідає прискоренню  $g$ . Тоді прискорення  $a$ , при другій кутовій частоті  $\omega$ , розраховують за формулою:

$$a = \frac{g\omega^2}{\omega_1^2} . \quad (26)$$

### 1.2.7. Калібрування ударом

Для вимірювання прискорення, що змінюється в часі, може бути використана лазерна інтерферометрія з підрахуванням інтерференційних смуг і вимірюванням тимчасових інтервалів [28]. За допомогою поліноміальної інтерполяції виміряних в різні моменти часу переміщень і подальшого подвійного диференціювання інтерполяційної кривої отримують сигнал прискорення. Для перетворювачів прискорення високої якості, що вимірюють пікове значення прискорення, розроблений метод калібрування з ударним збудженням за допомогою підвішених молота і ковадла [29]. Більшість первинних методів калібрування ударом засновані на принципі зміни швидкості. Це пов'язано з тим, що швидкість є фізичним параметром, який на практиці легко виміряти. Перетворювач, що калібрують, встановлюють на підвішеній ковадлі, яка знаходиться в стані спокою. Потім молотом вдаряють по ковадлу таким чином, щоб викликати її короткочасний рух. Напрямок осі чутливості перетворювача має точно збігатися з напрямком сили удару. В процесі удару записують вихідний сигнал перетворювача. В процесі удару записують тимчасовий вихідний сигнал перетворювача. Відразу після удару вимірюють збільшення швидкості ковадла  $\Delta v$  [27].

Швидкість може бути визначена шляхом вимірювання часу руху ковадла в межах відомої відстані. Зміна швидкості безпосередньо залежить від прискорення, збудженого ударом, і визначається за формулою:

$$\Delta v = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt , \quad (27)$$

де  $\Delta v$  – збільшення швидкості, м/с;

$a(t)$  – прискорення, м/с<sup>2</sup>.

Вихідний сигнал визначається формулою:

$$u_r(t) = S_r a(t) , \quad (28)$$

де  $S_r$  – коефіцієнт перетворення в одиницях вихідного сигналу на  $\text{м/с}^2$ .

Об'єднання формул (27) і (28) дозволяє розрахувати  $S_r$  за формулою:

$$S_r = \left[ \int_{t_1}^{t_2} u_r(t) dt \right] / \Delta v , \quad (29)$$

Градуювання шкал напруги і часу може бути здійснена подачею на прилад відомої напруги  $u_c$ , що діє на інтервалі  $t_c$ , і відліком по шкалі пристрою, що показує відповідних показань  $y_c$  і  $x_c$ . Коефіцієнти для градуювання шкали напруги  $K_1$  і для шкали часу  $K_2$  розраховують за формулами:

$$K_1 = \frac{u_c}{y_c} , \quad (30)$$

$$K_2 = \frac{t_c}{x_c} , \quad (31)$$

Площа  $A$  записаного вихідного сигналу перетворювача розраховують за формулою:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} y(x) dx , \quad (32)$$

де  $x_1$  і  $x_2$  – час початку і кінця удару;

$y(x)$  – вихідний сигнал напруги.

Підстановка формул (30, 31) і (32) в формулу (29) дозволяє отримати формулу для розрахунку коефіцієнта перетворення  $S_r$ :

$$S_r = \frac{K_1 K_2 A}{\Delta v} . \quad (33)$$

### 1.2.8. Калібрування методом порівняння

При калібруванні методом порівняння еталонний і перетворювачі, що калібрують, встановлюють так, щоб вони піддавалися однаковому вхідного впливу, після чого вимірюють їх вихідні сигнали  $u_1$  і  $u_2$  або їх відношення. Якщо обидва перетворювача калібрують по одній і тій же величині, наприклад по швидкості або по прискоренню, і їх сигнали лінійні, то модуль коефіцієнта перетворення  $S_2$  перетворювача, що калібрують, пов'язаний з модулем коефіцієнта перетворення  $S_1$  еталонного перетворювача формулою:

$$S_2 = \frac{u_2}{u_1} S_1. \quad (34)$$

Калібрування методом порівняння обмежене діапазоном частот, тривалістю імпульсу і амплітудами, на яких було проведено калібрування еталонного перетворювача. Комплексний коефіцієнт перетворення  $S_2$  також може бути визначений за цим методом, якщо відома фазочастотна характеристика еталонного перетворювача і виміряна різниця фаз сигналів  $u_1$  і  $u_2$ .

Якщо перетворювач треба бути відкалібрувати по іншій величині, ніж еталонний перетворювач (наприклад, перетворювач швидкості калібрують методом порівняння з перетворювачем прискорення), то у формулі для визначення коефіцієнта перетворення необхідно використовувати множник  $j\omega$  у відповідній мірі.



### 1.3. Особливості перевірки сейсмореєстраторів

#### 1.3.1. Методи перевірки

Перевірка сейсмореєстраторів проводиться для того, щоб встановити зв'язок між отриманими результатами дослідження з абсолютними еталонними значеннями відповідних фізичних величин. При перевірці визначають ступінь точності, відтворюваності та достовірності результатів вимірювань сейсмодатчика, а також знаходять межі діапазону вимірювань.

Основні параметри, які визначаються під час перевірки [8]:

- дійсне значення коефіцієнта перетворення на базовій частоті, розраховується, як відношення напруги на виході сейсмоприймача до діючого на нього прискорення [10]:

$$K = \frac{U}{A} = \left[ \frac{\text{мВ}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}} \right]; \quad (35)$$

- нерівномірність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), визначається за допомогою вимірювання коефіцієнта перетворення в декількох точках частотного діапазону;
- нелінійність амплітудної характеристики (АХ), визначається за допомогою вимірювання коефіцієнта перетворення в декількох точках амплітудного діапазону.

Існує два методи вимірювання вібрації:

- відносний;
- абсолютний.

Характеристики сейсмоприймачів визначають за допомогою вібростенда, їх перевірка проводиться в області низьких частот. При перевірці вібродатчиків використовують відносний метод вимірювання, при якому сейсмоприймач встановлюється на вібростенд в одному напрямку разом зі зразковим

акселерометром так, що на них діє однакове прискорення. За показами акселерометра контролюють параметри коливань, визначаються коефіцієнт перетворення за формулою (35) та віброприскорення.

Згідно з [9] рекомендоване віброприскорення при проведенні перевірки відносним методом вимірювання повинне бути не менше ніж  $10 \text{ м/с}^2$ . Більшість вібростендів мають амплітуду вібропереміщень в діапазоні 1-2 мм. Із таблиці 1 [8], можемо зробити висновок, що такі вібростенди не дають змоги проводити випробування на частотах нижче 10 Гц, а акселерометри не дають необхідної точності тому, що мають нерівномірну АЧХ в області низьких частот. Саме тому для перевірки сейсмодатчиків потрібно використовувати датчик переміщення, який повністю вирішує проблему точного відтворення вібрації на низьких частотах і контролю параметрів в процесі проведення випробувань [6]. Метод вимірювання з використанням датчика переміщень називається абсолютним.

Таблиця 1.1

Залежність віброприскорення від переміщення на різних частотах

Прискорення, $\text{м/с}^2$	Частота, Гц	Переміщення, мм
10	1000	0,000253
10	100	0,0253
10	10	2,53
10	1	253,3
10	0,1	25330

Інструментальна складова похибки вимірювання визначається такими складовими [7]:

- основна похибка, обумовлена неідеальністю власних параметрів, через відмінність перетворення вібрацій в електричний сигнал в нормальних умовах від номінальних умов;

- додаткова похибка, обумовлена реакцією акселерометра на зміни зовнішніх величин, які впливають на нього, та неінформативністю параметрів вхідного сигналу щодо їх нормальних значень. Ця складова залежить як від динамічних властивостей акселерометра, так і від змін зовнішніх впливаючих величин;

- динамічна похибка, обумовлена реакцією акселерометра на швидкість (частоту) зміни вхідного сигналу. Ця складова залежить як від динамічних властивостей акселерометра, так і від частотного спектра вхідного сигналу;

- похибка, обумовлена взаємодією акселерометра і об'єкта вимірювань. Підключення будь-якого засобу вимірювань до об'єкта вимірювання майже в будь-якому випадку призводить до зміни значення вимірюваної величини від реальних показів датчика.

Необхідно проводити нормування всіх складових похибки для статичного об'єднання всіх складових похибок в реальних умовах експлуатації.

### **1.3.2. Принцип роботи системи перевірки сейсмоприймачів**

За допомогою датчика переміщень контролюється вібрація, яка задається вібростендом, а саме частоту та переміщення. За цими даними розраховуються віброшвидкість та віброприскорення, а також коригується напруга, що подається на вібростенд в режимі реального часу, для того щоб забезпечити точність параметрів відповідно до випробування. Після стабілізації здійснюється аналіз сигналу, що надходить від сейсмоприймача, і розраховується його коефіцієнт перетворення на заданій частоті. Вимірювання проводяться в кожній точці 1/3 октавного ряду в усьому частотному діапазоні сейсмоприймача, після чого визначається нерівномірність АЧХ [6].

#### **1.4. Мета та задача дослідження**

Для досягнення мети дисертації треба було сформулювати і вирішити наступні задачі:

- вибрати кінематичну схему станду, провести проектування та дослідження характеристик його механічної та електромагнітної систем;
- провести моделювання роботи електромеханічної системи станду;
- розробити алгоритми і моделі інформаційно-вимірювальної системи;
- відпрацювати систему управління на електромеханічній моделі станду;
- розробити програмно-апаратну реалізацію системи управління станду;
- розробити метод розрахунку параметрів станду;
- провести роботи, пов'язані з його дослідною експлуатацією.

### 1.5. Висновки до розділу

На основі аналізу режимів роботи, умов та методів дослідження сейсмоприймачів різного типу можна зробити висновок, що відомі конструкції приладів інженерного дослідження та калібрування цих датчиків відповідають сучасним вимогам не в повній мірі.

В роботі основну увагу приділено розробці універсального стенду, який би мав, крім основних характеристик забезпечення необхідного частотного діапазону, рівня вібрації та забезпечення дослідження приладів масою до 15 кг, ще й такі важливі характеристики, як автономність живлення, портативність, можливість дослідження сейсмометрів з горизонтальною і вертикальною осями чутливості.

Розробка стенду з перерахованими характеристиками пов'язана з необхідністю проектування:

- механічної та електричної системи стенду;
- розробка програмно-апаратної реалізації систем стенду;
- моделювання роботи стенду в реальних умовах.

## РОЗДІЛ 2.

### РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ

#### 2.1. Вибір схеми побудови стенду для оцінки динамічних характеристик сейсмоприймачів

Основна увага при розробці стенду була зосереджена на розробці конструкції, яка могла б забезпечувати:

- необхідний частотний діапазон випробувань сейсмометрів. Так як, в основному, передбачалось проводити інженерні дослідження низькочастотних сейсмодатчиків типу: ВБП-3, ВГВБПП, ВИБ-А (И002), С-5-С, з періодом власних коливань 0.2 - 10 с, саме тому було вибрано діапазон коливань стенду в межах до 10 Гц;

- інженерне дослідження датчиків масою до 15 кг;

- динамічний діапазон зміщення рухомої платформи до 5 мм;

- число компонент – 2: по горизонтальній та вертикальній осях координат; в перспективі – можливість модернізації конструкції стенду до двокоординатного варіанту для дослідження датчиків при дії кругової вібрації;

- можливість демпфування коливань (в частках від критичного) 0,7;

- автономність живлення.

Загальний вигляд розробленої конструкції стенду представлений на рис.2.1.

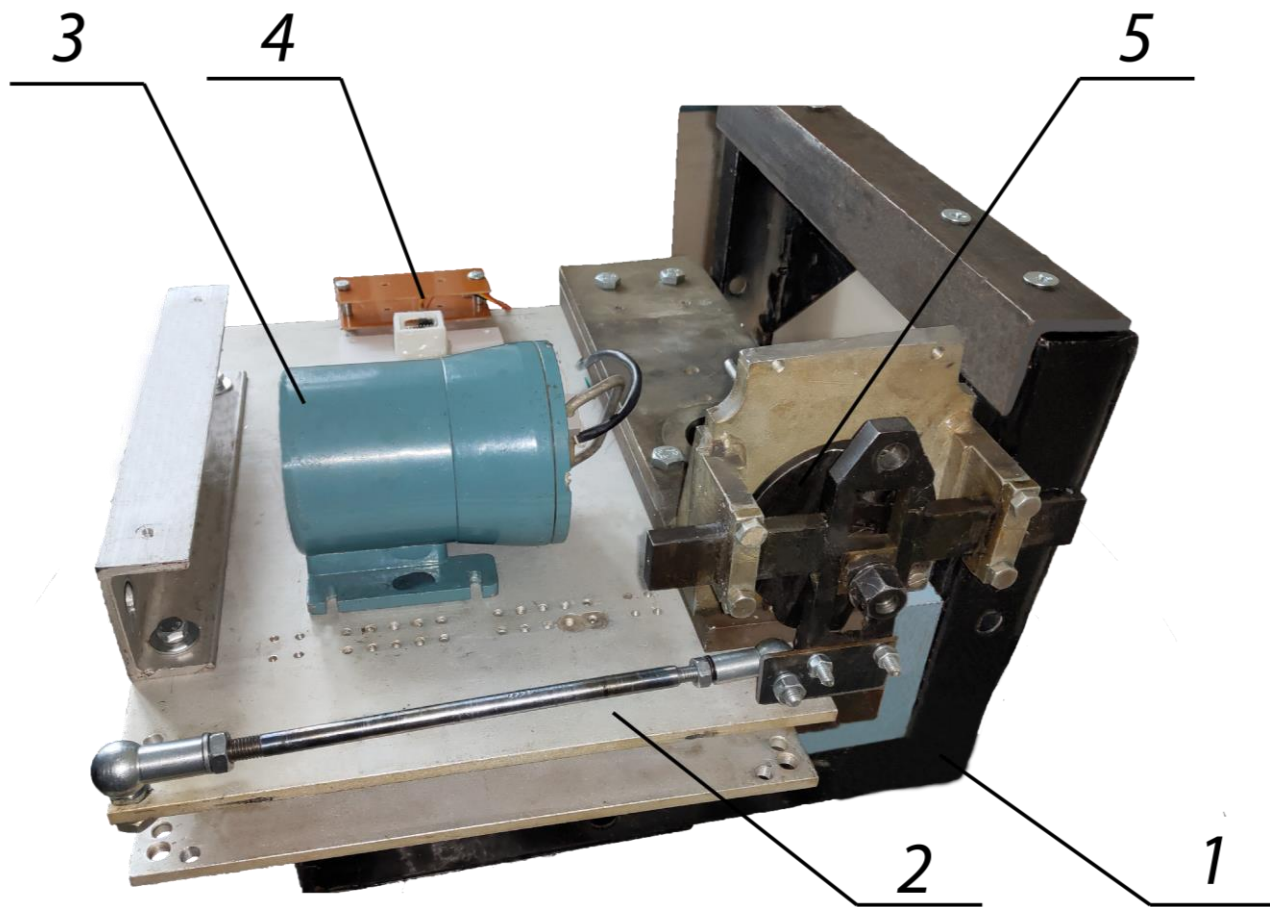


Рис. 2.1. Загальний вигляд стенду

1 – корпус стенду;

2 – рухома платформа;

3 – сейсмометр;

4 – інформаційно-вимірювальний модуль;

5 – модуль перетворення обертального руху в поступальний.



## 2.2. Аналіз механічної системи стенду

Розробка комбінованого (для дослідження сейсмодатчиків, як з горизонтальною, так і вертикальною осями чутливості) базувалася на використанні в механічній частині стенду автономного приводу, який зміг би забезпечити необхідні частоти коливань в межах 0 – 10 Гц.

Крім того, як було зазначено в п.2.1., необхідна умова використання стенду – можливість дослідження датчиків масою до 15 кг.

Також при розробці конструкції стенду для цілей польових випробувань виникла необхідність забезпечення портативності стенду, тобто можливість його переносу. Таким чином маса стенду не повинна перевищувати 25 кг.

Виникли досить суперечливі умови при проектуванні: вага сейсмодатчика, що буде досліджуватися – до 15 кг (наприклад, сейсмоприймач С-5-С) і вага всього стенду з приводом, механізмом перетворення обертального руху двигуна в поступальний рух платформи, модулем вимірювання та використання конфігурації корпусу стенду у такому вигляді, щоб забезпечити можливість дослідження датчиків як з горизонтальною так і вертикальною осями чутливості, повинна не перевищувати 25 кг.

Попередні розрахунки показали, що такі вимоги можна забезпечити при використанні плоских пружних елементів.

Така конструкція підвісу рухомої частини стенду в одній площині (вертикальній) може мати досить велику жорсткість (при відповідному розташуванні плоскої пластини «на ребро»), що дозволить проводити дослідження вимірювачів до 15 кг.

В той же час при коливаннях в горизонтальній площині, змінюючи конфігурацію кріплення рухомої частини з нерухомою, потрібно забезпечити досить низькі власні частоти коливання рухомої частини стенду.

Кінематична схема розробленого стенду представлена на рис.2.2.

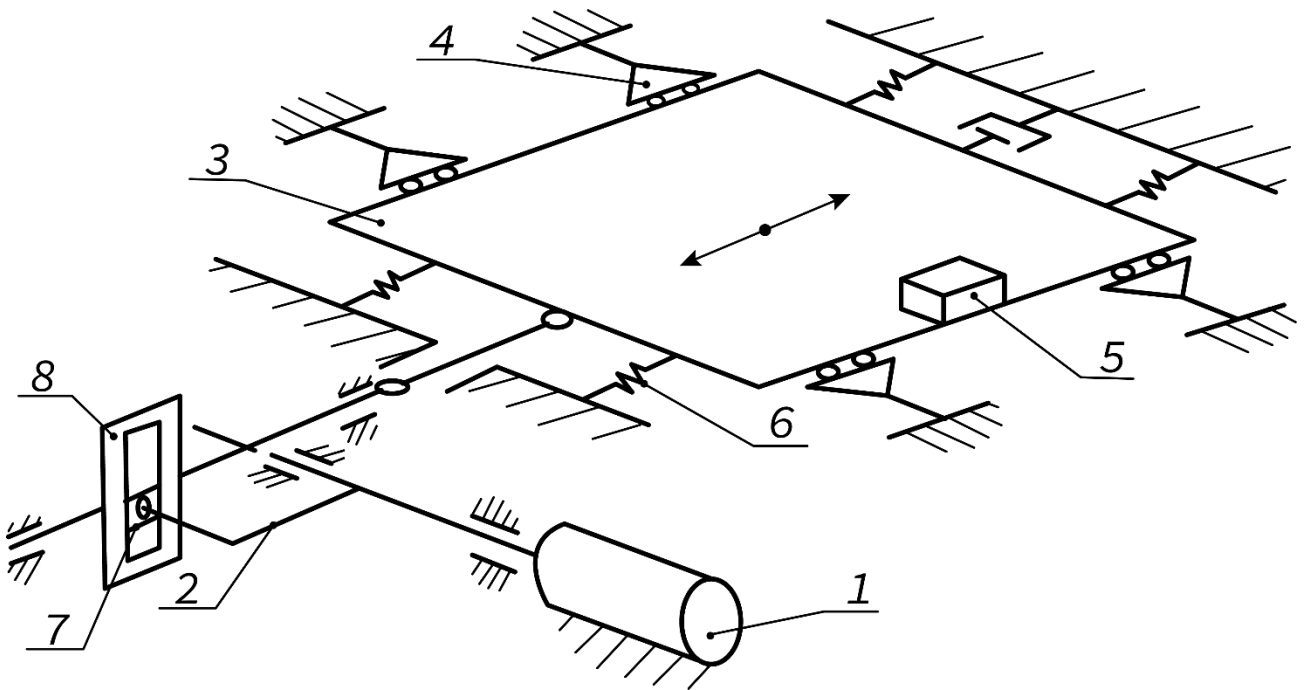


Рис. 2.2. Кінематична схема стенду

Механічна частина стенду складається з:

- модуля пружного підвісу стенду 6;
- модуля перетворення обертального руху двигуна в поступальний рух платформи 2, 7, 8;
- корпусу (раму) стенду;
- електродвигуна 1.

В конструкції стенду передбачена можливість розміщення ексцентрикового механізму для забезпечення кругового (еліптичного) руху платформи.

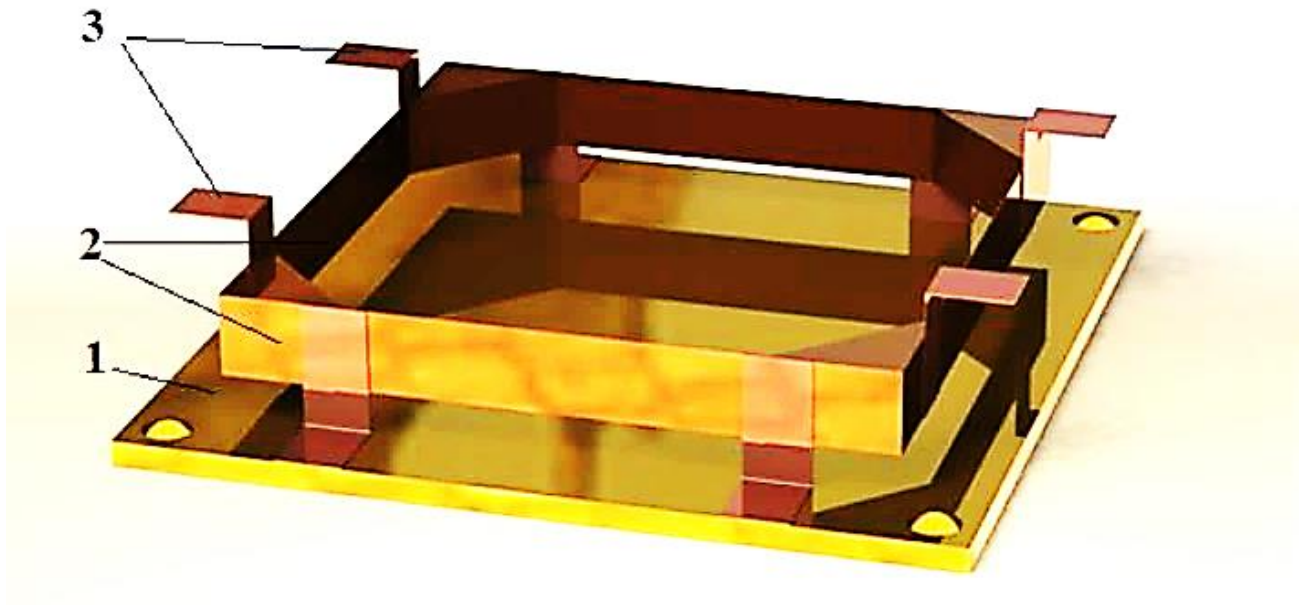


Рис. 2.3. Модель пружного підвісу стенду

Модель пружного підвісу стенду (див. рис.2.3) складається з горизонтальних плоских пружин 2, які за допомогою кутових елементів зібрані в «коробчасту» конструкцію.

Протилежні плоскі пружини, за допомогою елементів 3, кріпляться до рухомої та нерухомої платформ стенду.

Побудована таким чином конструкція забезпечує коливання рухомої пластини у двох взаємо-перпендикулярних напрямках. Це забезпечує можливість обертання рухомої частини стенду по колу (круговий рух).

Стенд має модуль перетворення обертального руху двигуна в поступальний рух платформи стенду. Специфіка перетворення обертального руху в поступальний обумовлює необхідність використання в конструкції кулісного механізму. Корпус такого механізму кріпиться на нерухомій частині стенду.

З валом двигуна 1 (див. рис.2.2) одним кінцем жорстко зв'язаний кривошип 2, а з другим – повзун 7, який переміщується в кулісі 8.

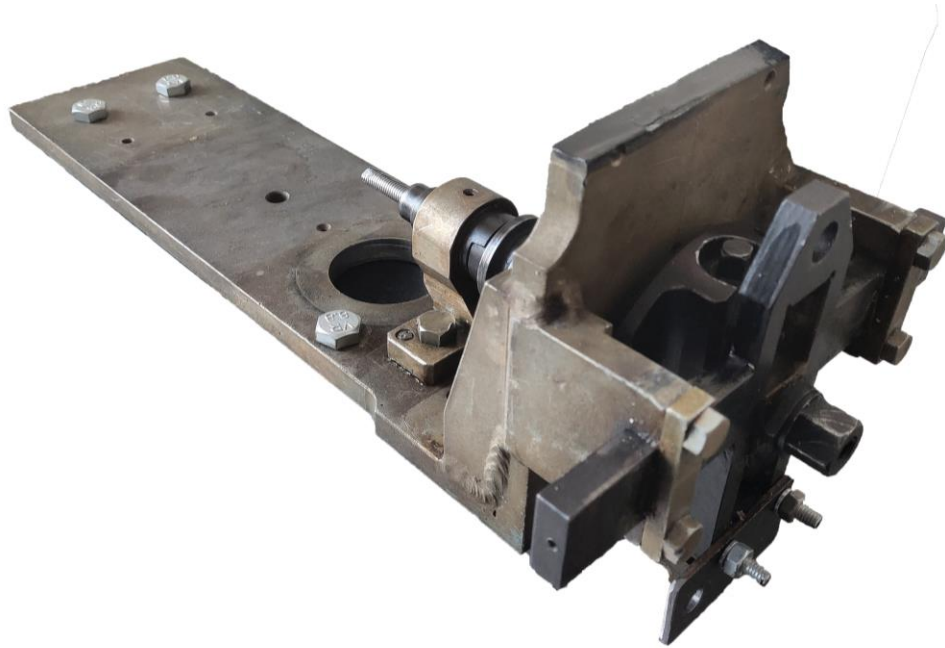


Рис. 2.4. Загальний вигляд кулісного механізму

Корпус стенду представляє собою зварну конструкцію з гнутого коробчастого профілю. Така конструкція забезпечує необхідну жорсткість та має невелику вагу.

Конфігурація корпусу забезпечує розташування вимірювальної осі стенду як в горизонтальному так і вертикальному положенні.

Рухома платформа стенду має досить великі розміри, що дає можливість досліджувати одночасно декілька датчиків.

В якості двигуна може бути використано двигун постійного струму з плавним регулюванням обертів, а також автономні побутові прилади.

Живлення стенду здійснюється від акумулятора будь-якого типу, що має напругу  $\pm 18$  В.

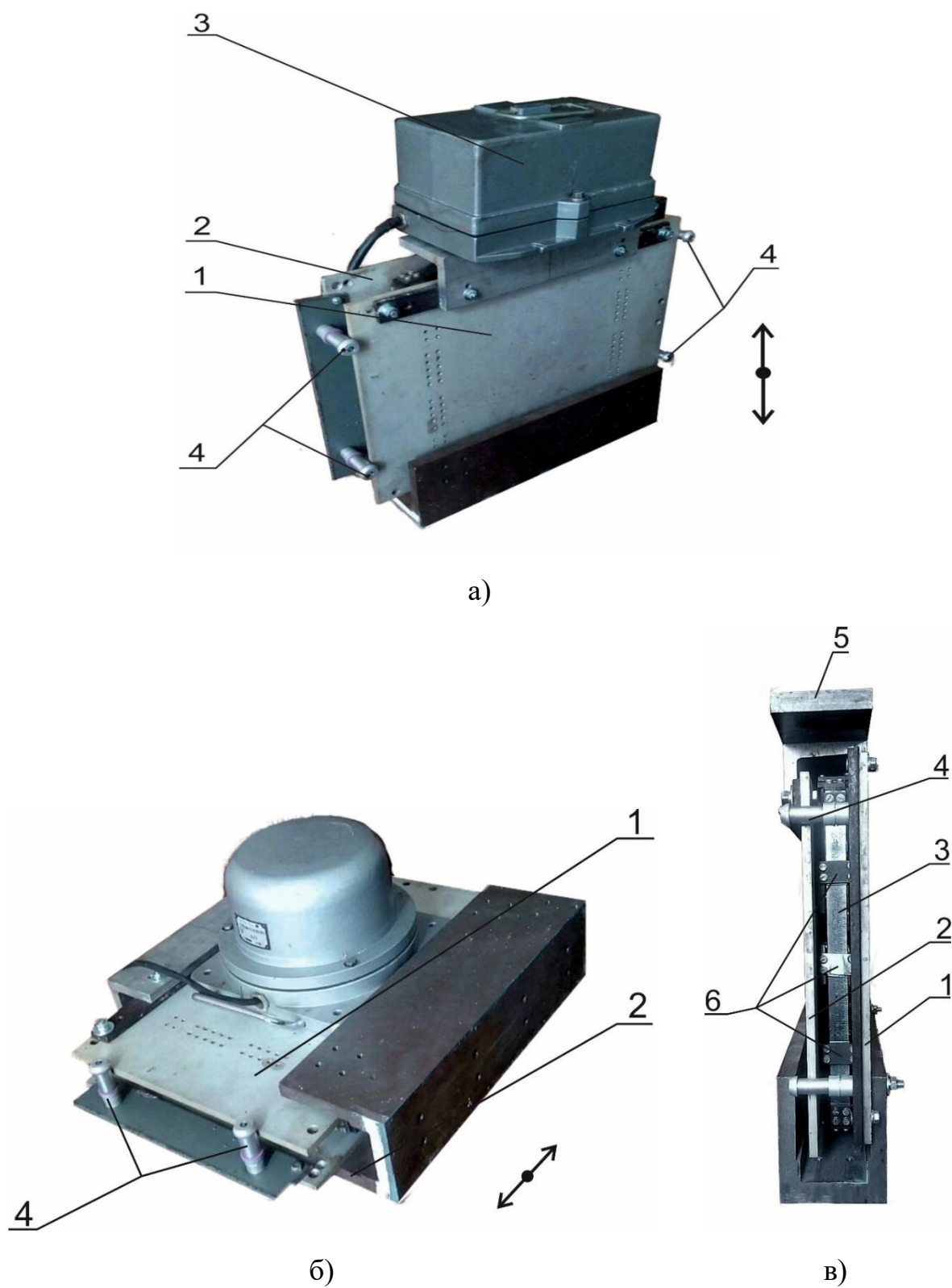


Рис. 2.5. Пристрій для збудження згасаючих коливань: а) у положенні дослідження горизонтальних коливань; б) у положенні дослідження вертикальних коливань; в) проекція, що демонструє пружні елементи пристрою

Конструкція розробленого пристрою для збудження згасаючих коливань представлена на рис.2.5.

Основними елементами якого є: рухома 1 і нерухома 2 платформи, які з'єднані між собою гнучкими пружними пластинами 3.

Технічні особливості пристрою полягають у тому, що поєднання горизонтальних і вертикальних переміщень рухомої платформи в одному пристрої досягається за рахунок використання симетричної конструкції розташування пружних елементів 3 та додаткових напрямних 4, в конструкції яких використовуються прецизійні шарикопідшипники. Останні необхідні для того, щоб забезпечити переміщення рухомої платформи тільки вздовж осі вимірювання [25].

Передбачена зміна власної частоти коливань пристрою. Регулювання частоти досягається:

- за допомогою додаткових вантажів 5, які установлюють на рухому платформу і разом з сейсмодатчиком змінюють загальну масу коливального тіла;
- зміною жорсткості пружних елементів 3, що досягається за рахунок зміни конфігурації розташування пружних опорних елементів 6.

Таке регулювання дає змогу змінювати власну частоту коливань рухомої платформи в межах 0 - 10 Гц.

Представлене конструктивне рішення стенду на основі використання плоских пружинних елементів суттєво спрощує конструкцію і дозволяє здійснювати електромеханічне керування, як з найменшими габаритами, так і оптимальними параметрами потужності.

### **2.3. Режими роботи при однокоординатному та двокоординатному режимах вимірювання**

Для роботи стенду при однокоординатному режимі в конструкції стенду передбачено використання чотирьох додаткових обертальних напрямних 4 (див. рис.2.5), які зібрані на шарикопідшипникових опорах. Основне призначення цих напрямних – забезпечення виключно лінійних коливань рухомої частини стенду вздовж вибраної осі. Напрявні заважають виникненню поперечних коливань рухомої пластини. Вимірювальна вісь може бути або горизонтальна, або вертикальна в залежності від розташування у просторі корпусу стенду.

Регулювання амплітуди коливань рухомої платформи стенду здійснюється за допомогою зміни довжини консолі, а частота – за допомогою зміни напруги живлення електродвигуна приводу.

Реконфігурацією системи кріплення плоских пружин та їх кількості (див. п.3.1) проводиться зміна власної частоти стенду. Моделювання та експериментальне дослідження стенду представлено в главі 3.

При роботі стенду в двокоординатному режимі збурення коливань (кругова вібрація) напрямні 4 і тяга, що з'єднує кулісний механізм з рухомою платформою стенду, знімаються. Сигнали акселерометра з інформаційно-вимірювального модулю при двовісній лінійній вібрації наведено на рис.2.6 [32].

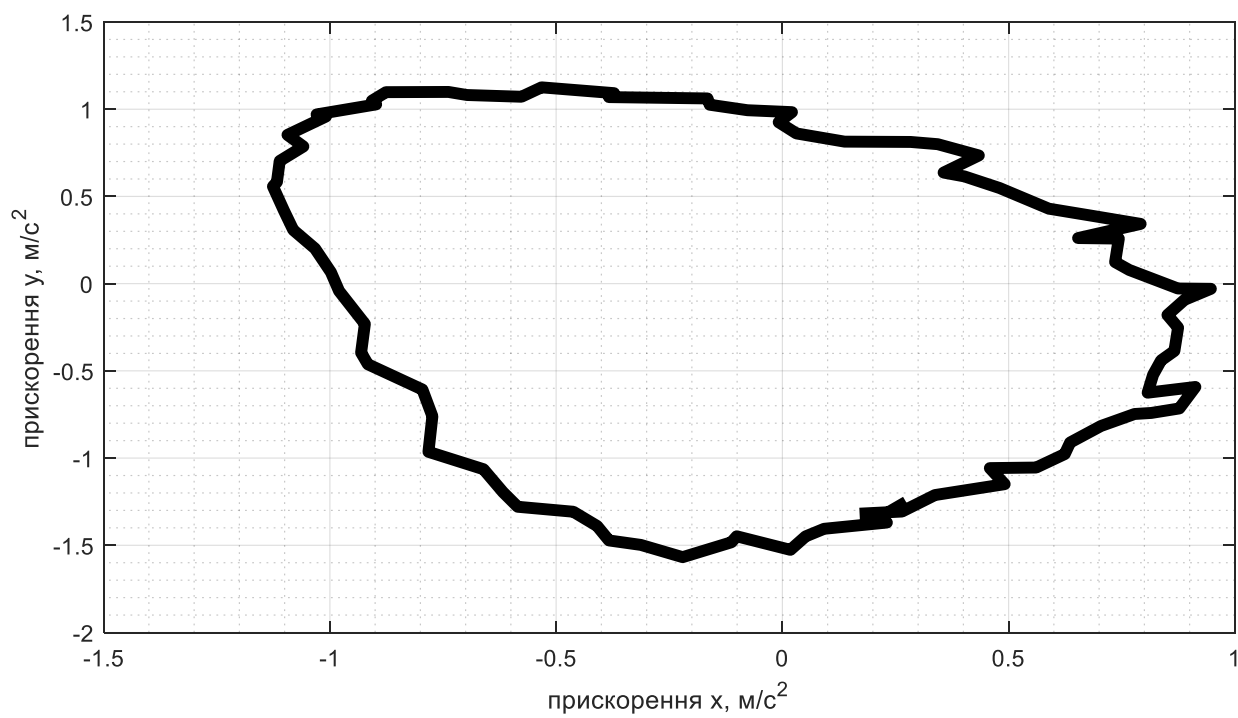


Рис. 2.6. Двокоординатний режим коливань стенду

Тривимірна модель стенду представлена на рис. 2.7, 2.8.

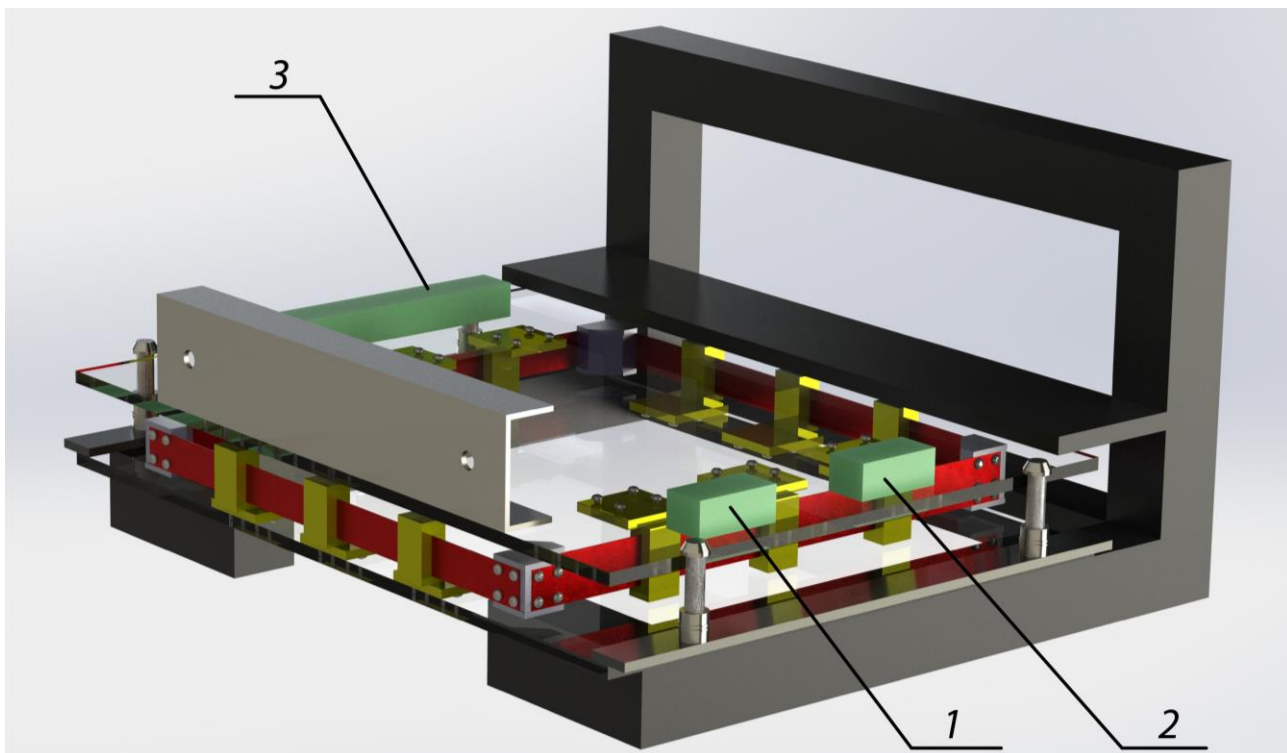


Рис. 2.7. Тривимірна модель стенду у положенні формування горизонтальних лінійних коливань



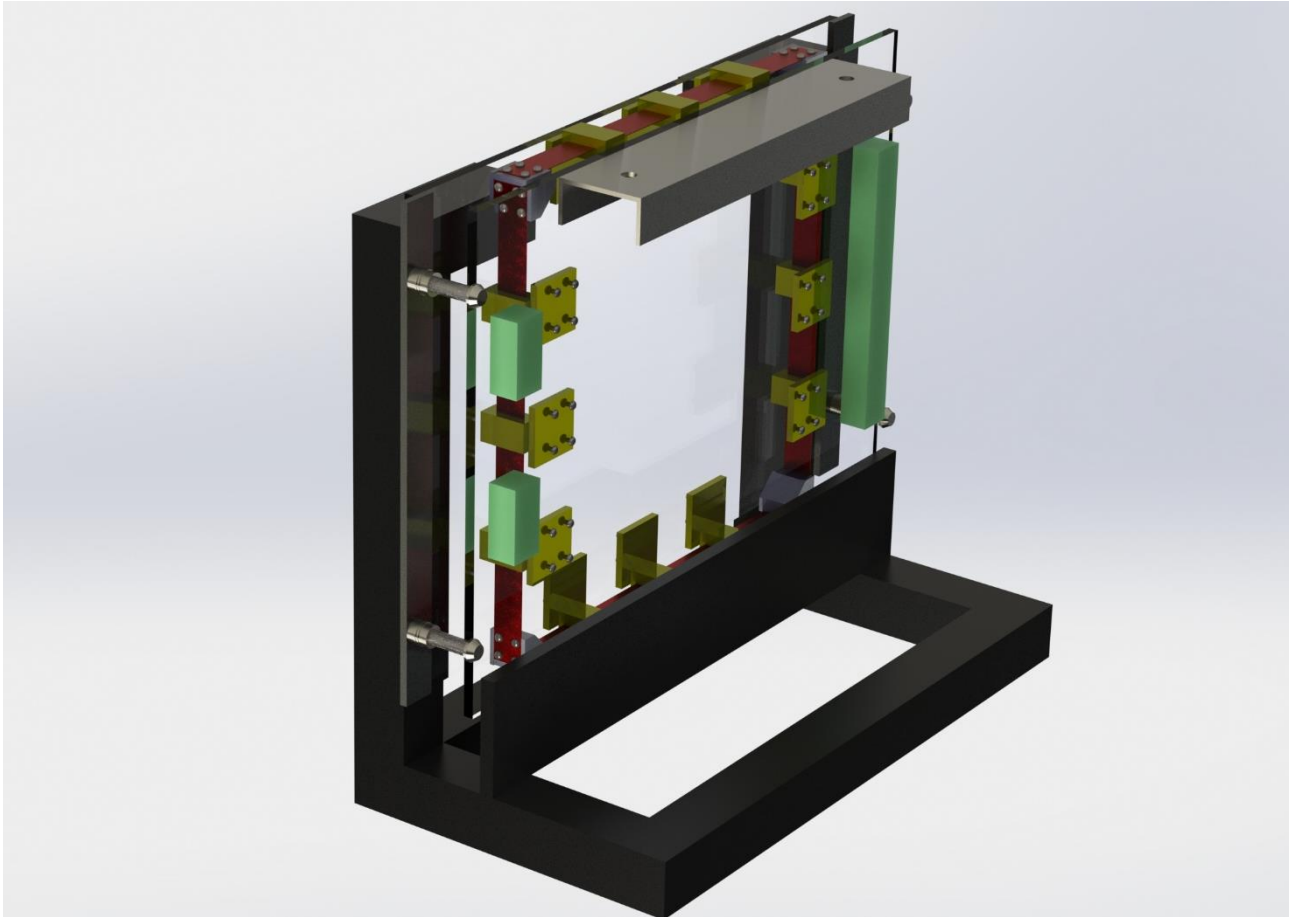


Рис. 2.8. Тривимірна модель стенду у положенні формування вертикальних лінійних коливань

На рис.2.7 представлені елементи інформаційно-вимірювально модуля:

- трьохвісний акселерометр 1;
- магнітоелектричний датчик віброшвидкості 2;
- потенціометричний датчик лінійних переміщень 3.

## 2.4. Забезпечення динамічного діапазону коливань механічної системи стенду

### 2.4.1. Математична модель випробувального вібростенду

При складанні динамічних рівнянь випробувального стенду були прийняті наступні вихідні умови і припущення [30]:

- рами і осі підвісу модуля обертання приймаються абсолютно жорсткими;
- шарикопідшипники (ШП) по осях підвісу приймаються абсолютно жорсткими; в ШП мають місце тільки малі контактні деформації, що впливають на моменти тертя кочення;
- приладовий блок вібростенду жорстко пов'язаний з рамою і розглядається як тверде тіло;
- вісь рами є віссю симетрії системи;
- центр мас системи знаходиться в центрі рухомої платформи;
- рухома платформа стенду розташована паралельно нерухомій;
- процеси в двигуні приймаються квазістаціонарними;
- інерційним збуренням стенду від дії кулісного механізму при виведенні динамічних рівнянь знехтувано;
- муфта ходової частини механізму приймається абсолютно жорсткою.

Математична модель руху стенду являє собою диференціальне рівняння руху, отримане з урахуванням зазначених вище припущень, і має такий вигляд:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + n_0x = 0, \quad (36)$$

де  $x$  – зміщення рухомої платформи стенду відносно корпусу;

$h = \mu/t$  – коефіцієнт загасання;

$n_0^2 = c/t$  – квадрат частоти власних коливань рухомої частини стенду;

$\mu$  – коефіцієнт сил в'язкого тертя;

$t$  – маса рухомої частини стенду, яка складається з маси рухомої платформи і маси датчиків, закріплених на ній;

$c$  – жорсткість пружних елементів системи підвісу рухомої платформи.

Конструктивним вузлом, який визначає функціональні можливості стенду є система підвісу рухомої платформи.

На рис.2.9 представлена принципова схема системи підвісу стенду, який складається з рухомої платформи 1, системи пружних елементів 2, 3, які скріплені так як показано на рис.2.9.

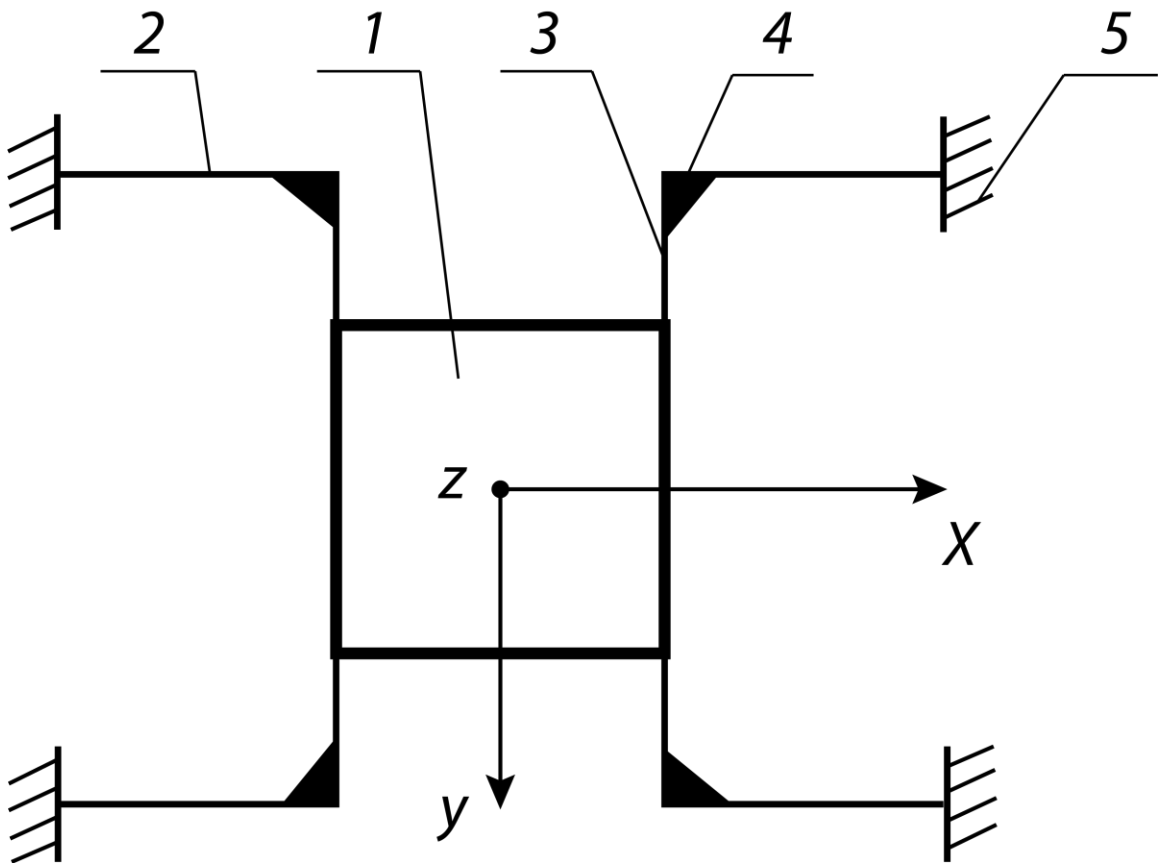


Рис. 2.9. Принципова схема підвісу рухомої платформи стенду

При цьому пружні елементи 2 формують коливання вздовж осі  $y$ , а пружні елементи 3 – вздовж осі  $x$ . Елементи 4 забезпечують жорсткість конструкції в місцях з'єднання пружних елементів.

В розробленій конструкції є можливість змінювати не тільки довжину пружних елементів (2, 3), але і їх кількість. Тобто, є можливість цілеспрямовано збільшувати власні параметри стенду, в першу чергу власну частоту коливань рухомої платформи.

$$\ddot{x} + b_x \dot{x} + G_x x = 0, \quad (37)$$

де  $b_x$  – коефіцієнт демпфування інерційної маси в напрямку осі  $x$ ,

$G_x$  – жорсткість одного пружного елемента підвісу в напрямку осі  $x$ .

Жорсткість  $G_{4x}$  чотирьох пружних пластин 3 в напрямку осі  $x$  дорівнює:

$$G_{4x} = 4G_x. \quad (38)$$

Власна недемпфована частота коливань у цьому випадку:

$$\omega_{x_0} = \sqrt{\frac{G_{4x}}{m}}. \quad (39)$$

Можна вважати, що в розглянутій схемі пружні елементи підвісу піддаються тільки деформації згину. При цьому пружні елементи на кінцях жорстко защемлені. В цьому випадку для обчислення жорсткості на згин кожного пружного елемента можна скористатись формулою [35]:

$$G_{4x} = \frac{48 \cdot E \cdot I_x}{l^3}, \quad (40)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу на згин,

$I_x$  – момент інерції поперечного перерізу пружини відносно осі  $x$ ,

$l$  – довжина пружини.

Розв'язання практичних задач про коливання системи підвісу вимагають достовірних відомостей про характер конструкційного демпфування, яке може бути отримано дослідним шляхом.

В роботі використовується метод визначення демпфування вільних загасаючих коливань на основі аналізу осцилограми загасаючих коливань.

### 2.4.2. Розрахунок параметрів випробувального вібростенду

Обчислимо жорсткість системи підвісу рухомої платформи стенду, представлений на рис.2.9, для наступних параметрів:

- модуль пружності матеріалу  $E = 200$  ГПа (сталь 65Г);
- довжина підвісу  $l = 0.1296$  м;
- момент інерції поперечного перерізу пружини:

$$I_x = \frac{bh^3}{12}; \quad (41)$$

- ширина пружини  $b = 21.3 \cdot 10^{-3}$  м;
- товщина пружини  $h = 0.4 \cdot 10^{-3}$  м;

З формули (41):

$$I_x = \frac{21.3 \cdot 10^{-3} \cdot (0.4 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 0.11 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4,$$

тоді за формулою (40) жорсткість підвісу:

$$G_{4x} = \frac{48 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0.11 \cdot 10^{-12}}{0.1296^3} = 4.85 \cdot 10^2 \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

тоді за формулою (39) власна частота коливань:

$$\omega_{x_0} = \sqrt{\frac{4.85 \cdot 10^2}{10}} = 6.93 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$f_{x_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{6.28}{6.96} = 0.91 \text{ Гц.}$$

Аналогічно проведено обчислення власних частот коливань стенду для інших параметрів підвісу. При цьому довжина пружних елементів змінювалась в межах 13 – 4 см, а масу платформи з датчиком – в межах 3.8 – 15.8 кг.

## 2.5. Вимірювальний модуль стенду

Вимірювальний модуль стенду складається з трьох датчиків:

- акселерометра для вимірювання віброприскорення;
- магнітоелектричного датчика швидкості для вимірювання віброшвидкості;
- потенціометричного датчику переміщень для вимірювання вібропереміщення.

Використовувався трьохосьовий акселерометр MPU-6050 GY-521 з влаштованим 16-бітним АЦП на базі модулю 6DOF, що керується за протоколом I2C (TWI).

Акселерометри – датчики лінійних прискорень, призначені для вимірювання прискорення рухомого об'єкту і перетворення прискорення в пропорційний йому електричний сигнал. Акселерометри вимірюють складові вектора прискорення по осях чутливості, а для отримання повного вектора прискорення необхідно мати три акселерометра [34].

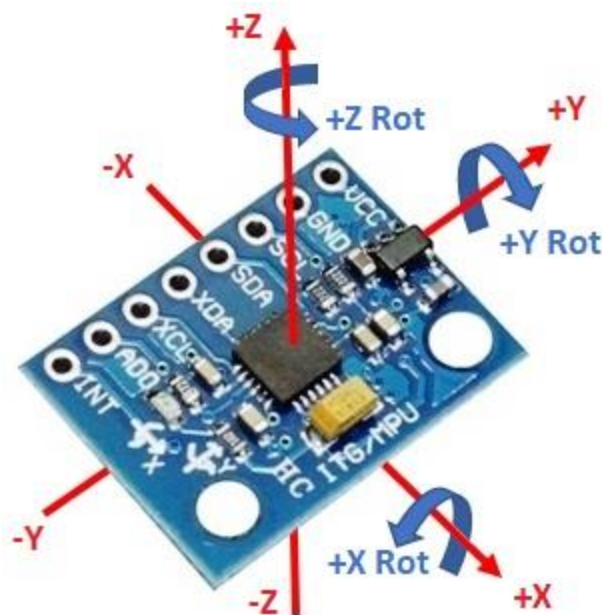


Рис. 2.10. Загальний вигляд акселерометру MPU-6050 GY-521

Загальний вигляд акселерометру MPU-6050 GY-521 представлений на рис.2.10.

Характеристики MPU-6050 GY-521:

- напруга живлення: 3-5 В;
- діапазон вимірювання:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16$  g;

Акселерометр попередньо був відкалібрований на ОДГ.

Також був використаний потенціометричний датчик лінійних переміщень bwl-100mm bestnew. Датчик призначений для вимірювання коротких переміщень і працює як абсолютний вимірювач. Оскільки датчик потенціометричний – він не втрачає свого положення при відключенні живлення. Використовується для вимірювання лінійних рухів для одностороннього приводного стрижня. Такий датчик не схильний до зносу, і працює протягом тривалого часу з періодом життєзабезпечення до 100 мільйонів циклів. Потенціометричний датчик лінійних переміщень здійснює стабільні і точні вимірювання кожного разу, оскільки змінює лінійний опір за допомогою спеціальних методів.

Характеристики bwl-100mm bestnew:

- діапазон вимірювань: до 100 мм;
- швидкість переміщення: 10 м/с;
- відхилення від лінійності:  $\pm 0.1\%$ ;
- хід штока: односторонній;
- опір датчика: 5 кОм.

Схема потенціометричного датчика лінійних переміщень представлена на рис.2.12.



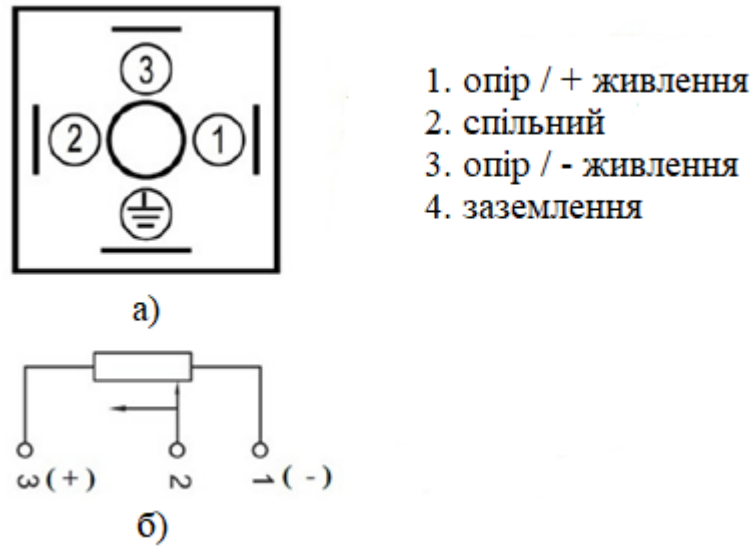


Рис. 2.11. Схема підключення датчика bwl-100mm bestnew: а) контакти, б) потенціометричне з'єднання

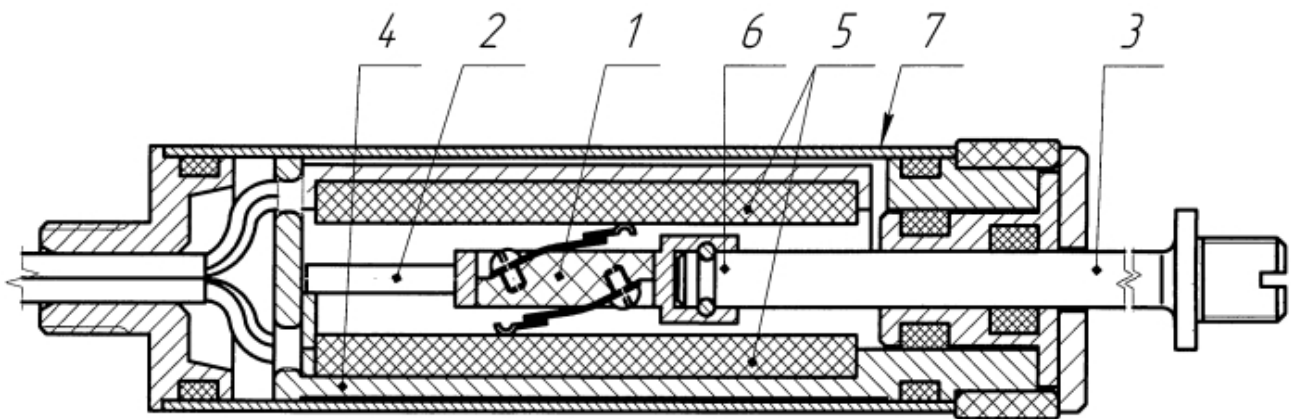


Рис. 2.12. Схема потенціометричного датчика лінійних переміщень

Датчик працює наступним чином. При лінійному переміщенні контрольованого об'єкта пов'язаний з ним шток 3 (див. рис.2.12), який рухається по двох напрямних 2, переміщує за допомогою вузла 6 рухливу каретку з двома струмознімачами 1 щодо корпусу 4. Струмознімачі, переміщаючись по резистивному шару двох електрично ізольованих резистивних елементів 5, змінюють опір потенціометричного датчика лінійних переміщень. Зовнішній

кожух 7 і шток 3 ущільнені гумовими кільцями, що захищає від попадання всередину вологи і сторонніх часток.

Магнітоелектричний датчик швидкості в даній роботі не використовувався.

Для реєстрації та збереження сигналу з датчиків використовувався контролер UNO R3 CH340G побудований на чіпі ATmega328P і USB-UART конвертері CH340G. Контролер має microUSB роз'єм, за яким, крім підключення плати до ПК, можливо подавати живлення.

Характеристики UNO R3 CH340G:

- робоча напруга: 5 В;
- вхідна напруга (рекомендована): 7-9 В;
- вхідна напруга (гранична): 7-12 В;
- цифрові Входи / Виходи: 14;
- аналогові входи: 8;
- постійний струм через вхід / вихід: 40 мА;
- постійний струм для виведення 3.3 В: 50 мА;
- флеш пам'ять: 32 Кб;
- тактова частота: 16 МГц.

Загальний вигляд контролеру UNO R3 CH340G представлено на рис.2.13.

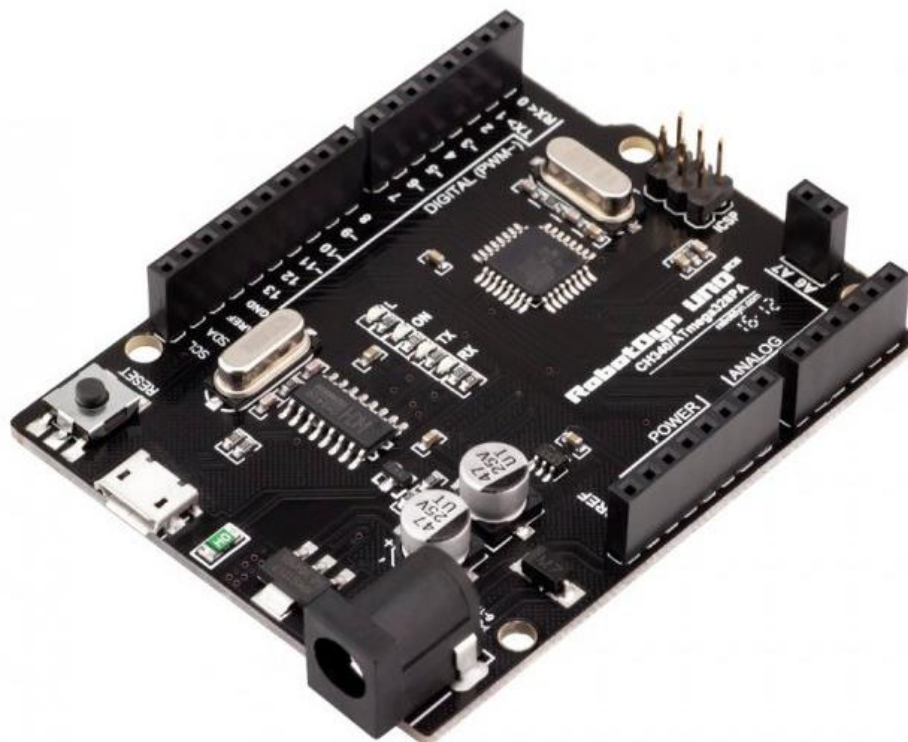


Рис. 2.13. Загальний вигляд контролеру UNO R3 CH340G

Програмний код, що використовувався для знаття інформації при дослідженні вібростенду за допомогою контролера UNO R3 CH340G представлений в додатку 1.

## **2.6. Висновки до розділу**

В результаті проведеного аналізу можливих схем побудови стенду було вибрано схеми на основі використання плоских пружних елементів системи підвісу.

Така конструкція дає можливість реалізувати основні вимоги до стенду: автономність, універсальність, портативність.

Вибрана конструкція має ще одну перевагу – невелику масу (по відношенню до можливості проведення дослідження з датчиками масою до 15 кг).

Було розроблено інформаційно-вимірювальний модуль стенду, який складається з акселерометра, магнітоелектричного датчика віброшвидкості, потенціометричного датчику переміщень та контролера для відтворення сигналу, і забезпечує інформацію для подальшого обчислення характеристик вібростенду.

### РОЗДІЛ 3.

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТЕНДУ

В розділі представлені основні результати перевірки стенду при дії як вертикальної, так і горизонтальної вібрації. В п.3.1 вихідні параметри, що досліджувалися були: деформація пружних елементів (зміщення рухомої платформи від положення в стані спокою) та частота власних коливань стенду залежно від конфігурації кріплення (довжини консолі). Моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення SolidWorks Simulation.

В п.3.2 вихідні параметри, що вимірювались були: прискорення та переміщення при низьких, середніх та високих частотах. Обчислення, фільтрація та відтворення сигналів на графіках проводилося за допомогою програмного забезпечення MatLAB. Фільтрація сигналів проводилася за допомогою інструменту cftool в режимі sumsine, для кожного сигналу створювалась власна модель фільтрації. З графіків визначалися параметри: амплітуда та період коливань, за допомогою яких було розраховано частоту вимушених коливань вібростенду, віброприскорення, віброшвидкості та вібропереміщення.

Вібропереміщення – показує максимальні межі переміщення контрольованої точки в процесі вібрації.

Віброшвидкість – це швидкість переміщення контрольованої точки обладнання під час її переміщення вздовж осі виміру.

Віброприскорення – це значення вібрації, яке прямо пов'язане з силою, що викликала вібрацію.

Програма, яка використовувалася в програмному забезпеченні MatLAB для обчислення, фільтрації та відтворення сигналів на графіках при дослідженні вібростенду представлена в додатку 2.

### 3.1. Дослідження впливу зміни конфігурації системи підвісу на власні коливання стенду

На рис.3.1–3.7 показано результати моделювання власних коливань дослідного стенду при зміні довжини консолі (конфігурації кріплення пружних елементів), маса платформи разом з датчиком при цьому дорівнює 5 кг.

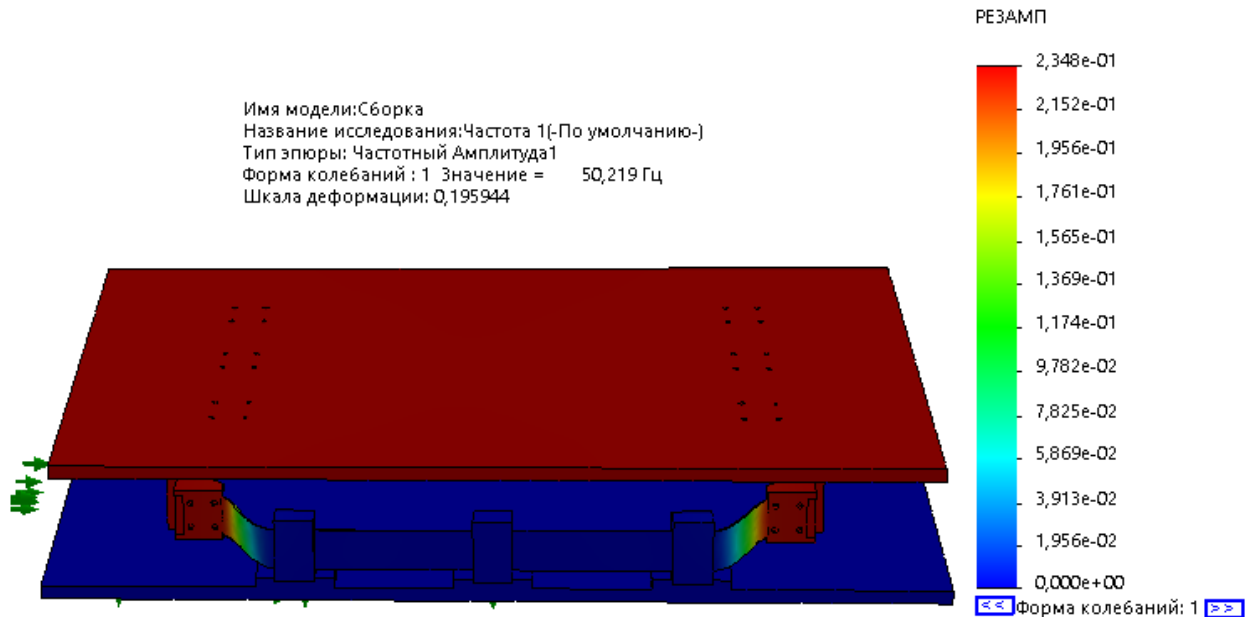


Рис. 3.1. Результат моделювання: маса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 30 мм

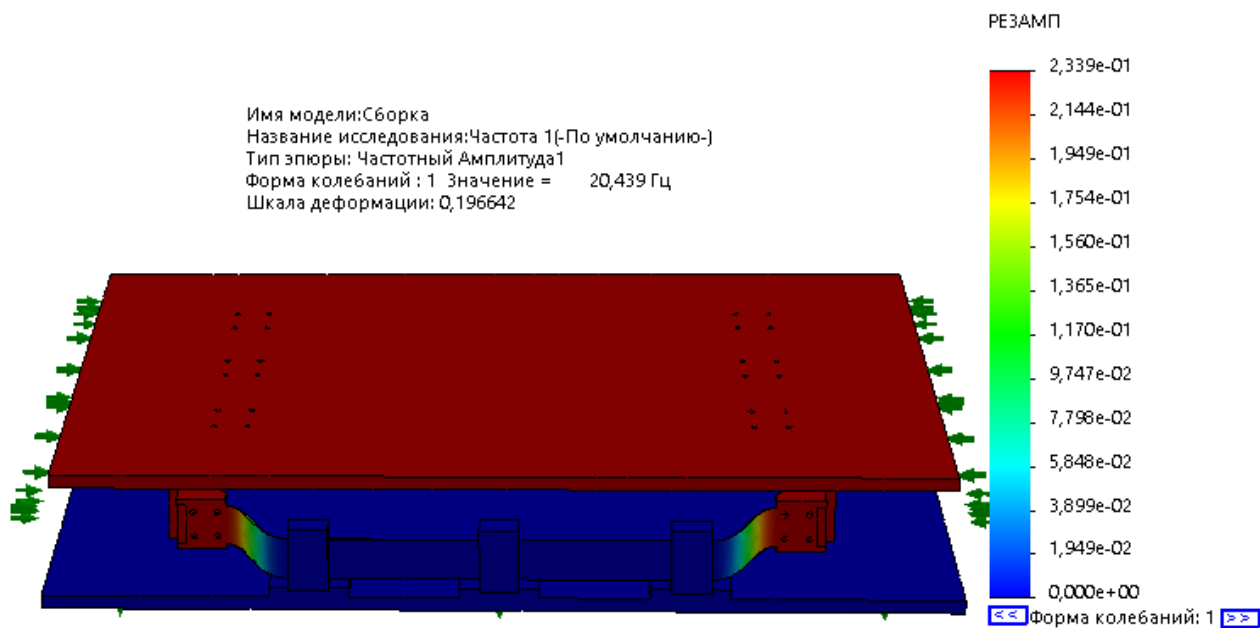


Рис. 3.2. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 35 мм

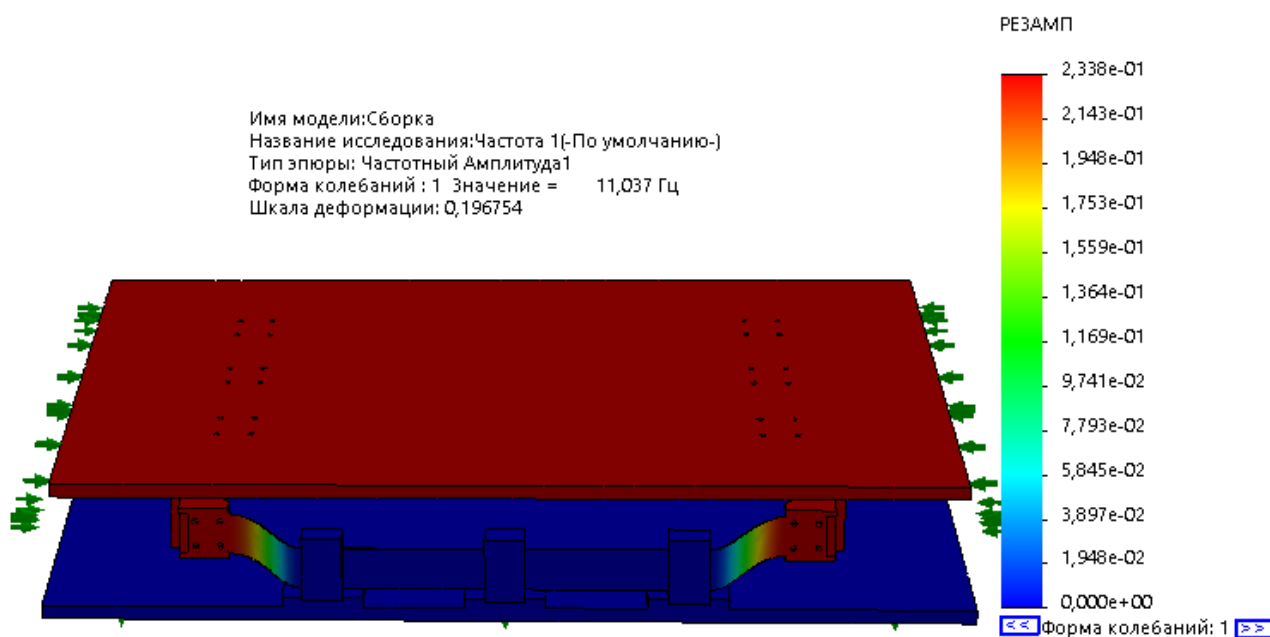


Рис. 3.3. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 40 мм

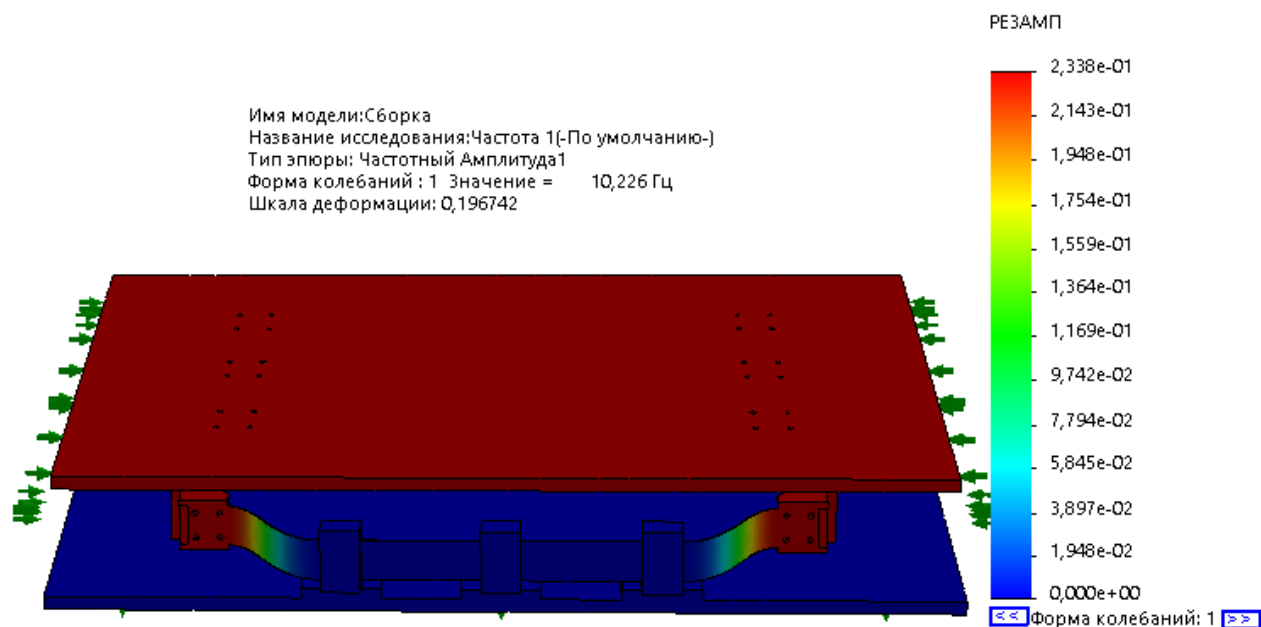


Рис. 3.4. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 50 мм

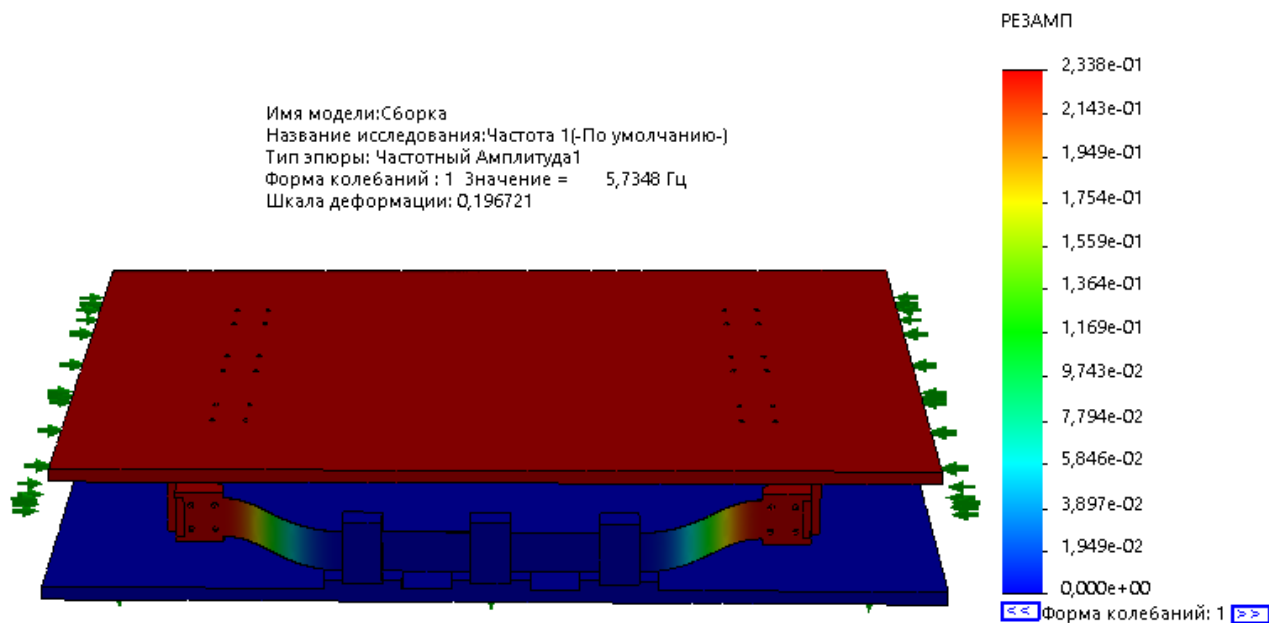


Рис. 3.5. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 65 мм



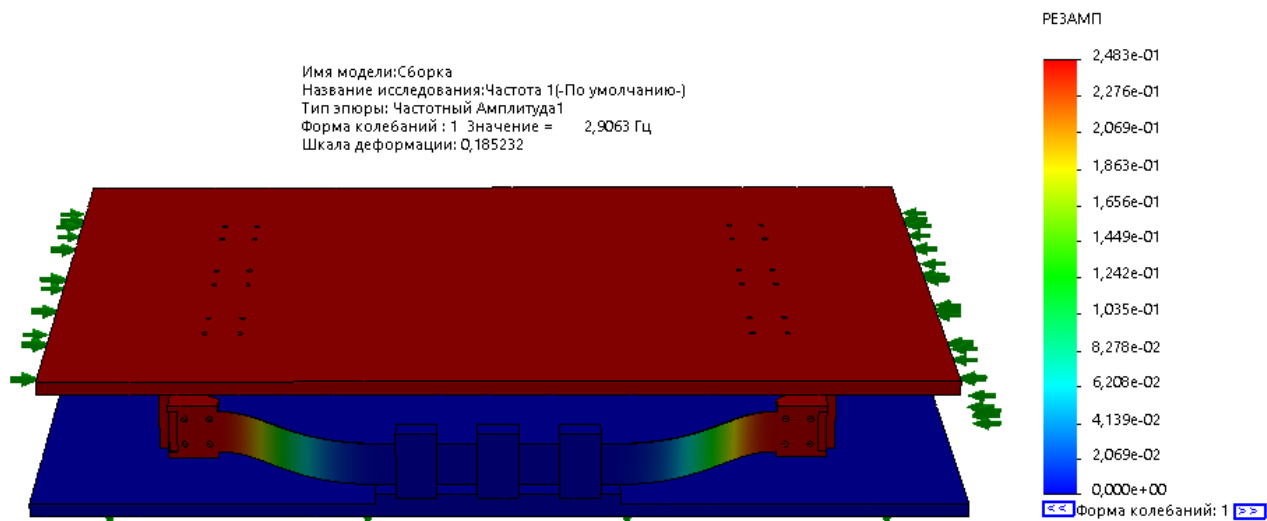


Рис. 3.6. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 89.6 мм

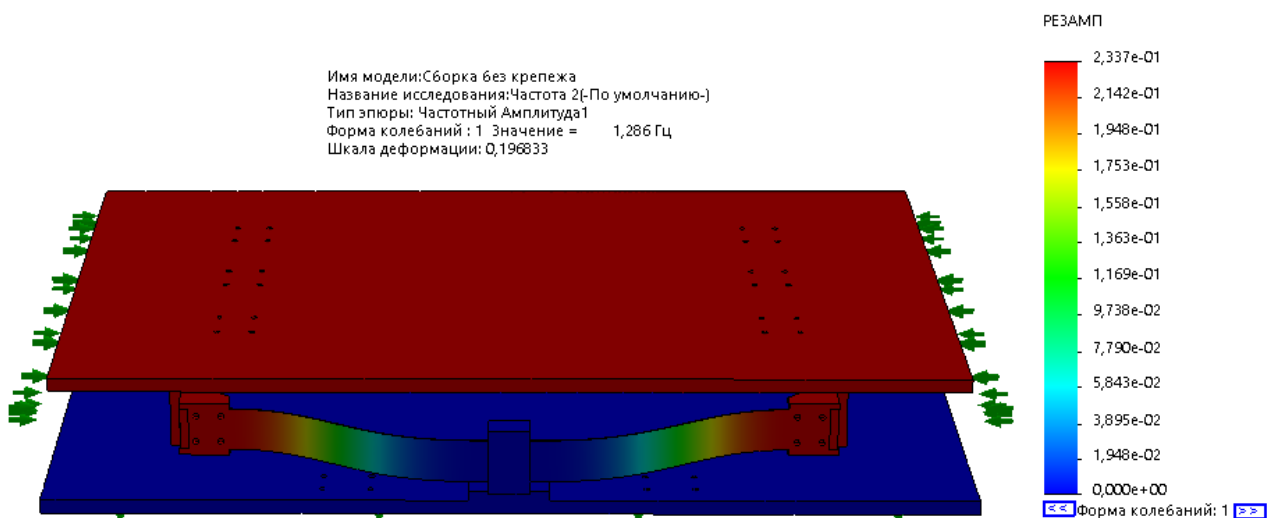


Рис. 3.7. Результат моделирования: масса вимірювального пристрою 5 кг, довжина консолі 129.6 мм

На рис.3.8 наведено графік зміни частоти власних коливань стенду в залежності від конфігурації кріплення, побудований по результатам моделювання, представлених на рис.3.1–3.7.

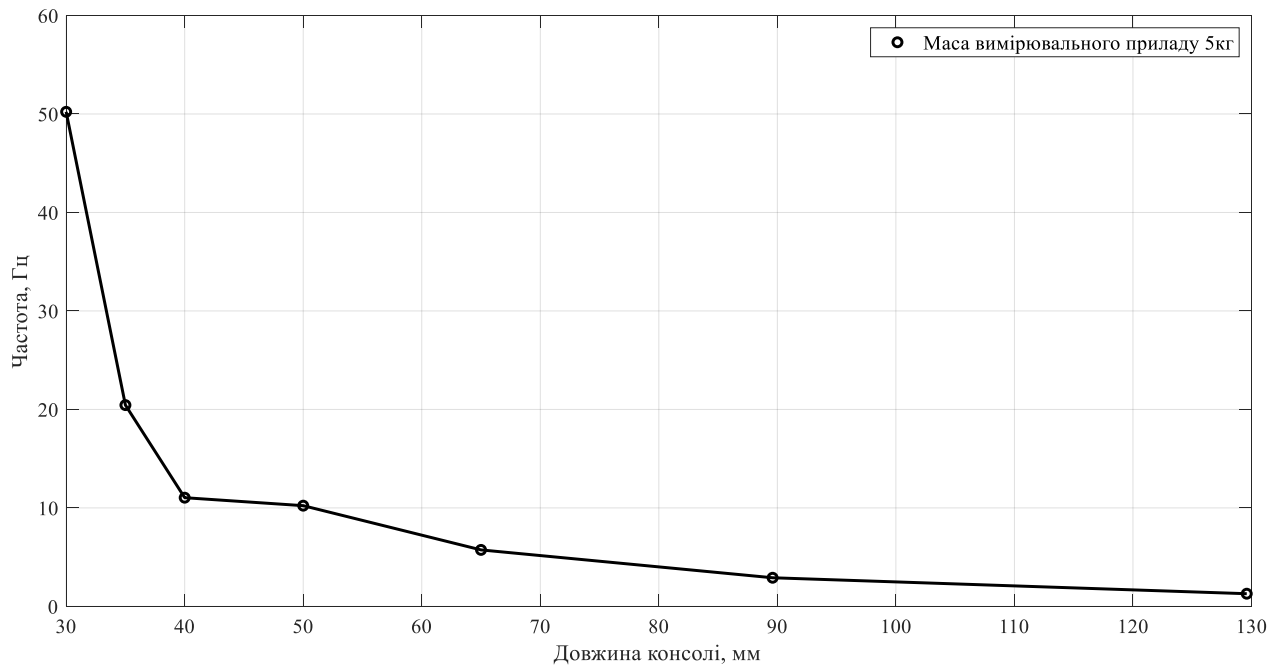


Рис. 3.8. Зміна частоти власних коливань стенду в залежності від конфігурації кріплення (довжина консолі: 30, 35, 40, 50, 65, 89.6, 129.6 мм)

На рис.3.9–3.12 показано результати моделювання власних коливань дослідного стенду при зміні маси вимірювального пристрою, довжина консолі при цьому дорівнює 50 мм.

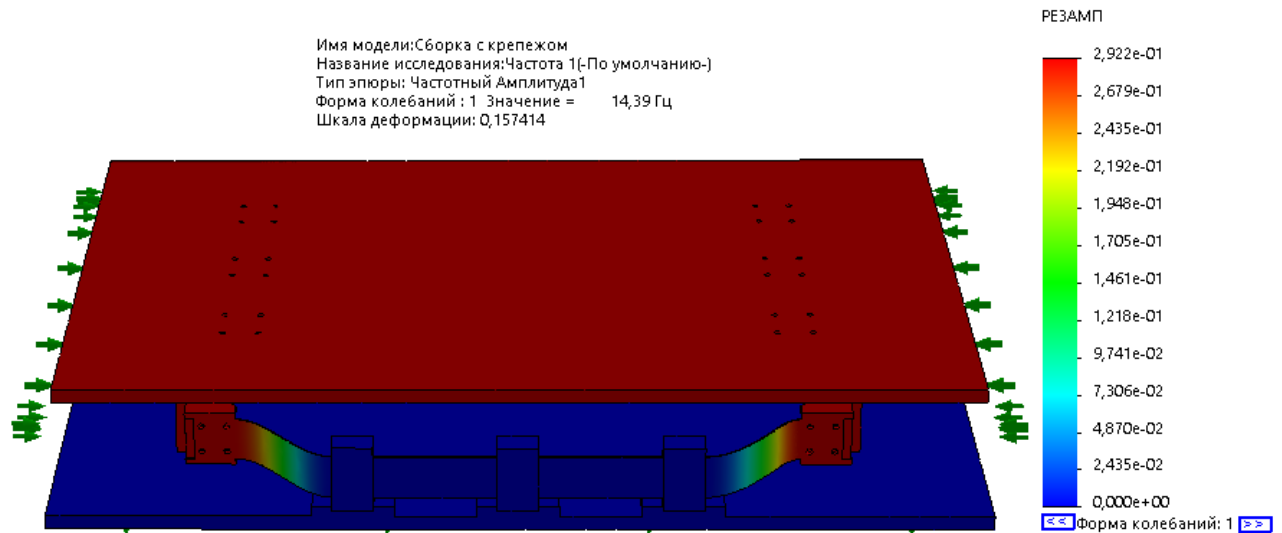


Рис. 3.9. Результат моделювання: довжина консолі 50 мм, маса вимірювального пристрою 0.5 кг

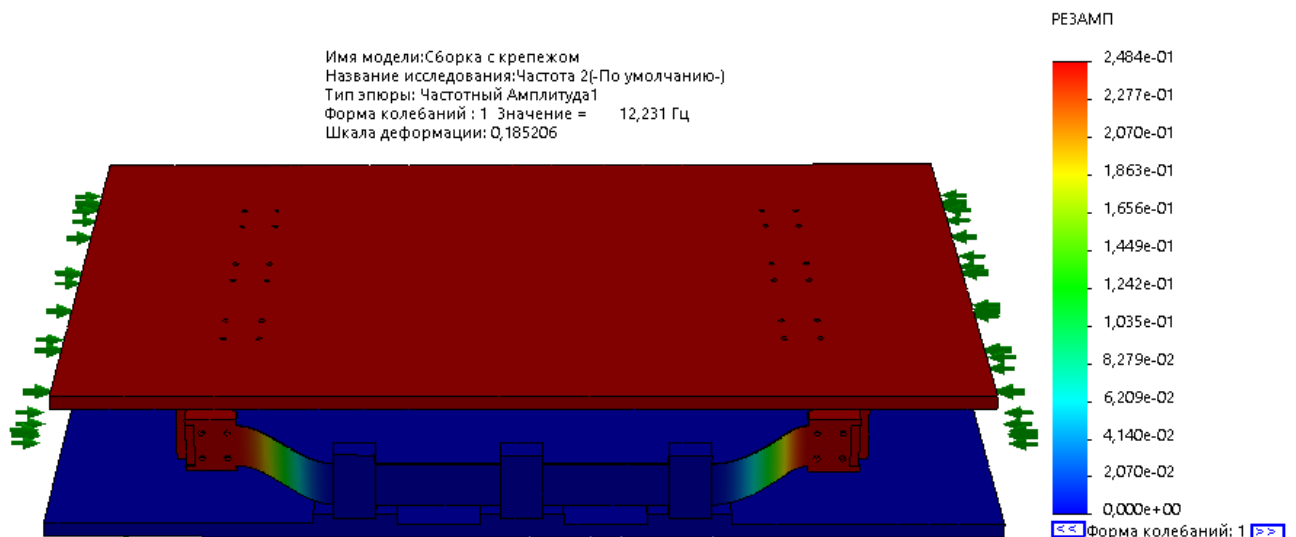


Рис. 3.10. Результат моделювання: довжина консолі 50 мм, маса вимірювального пристрою 5 кг

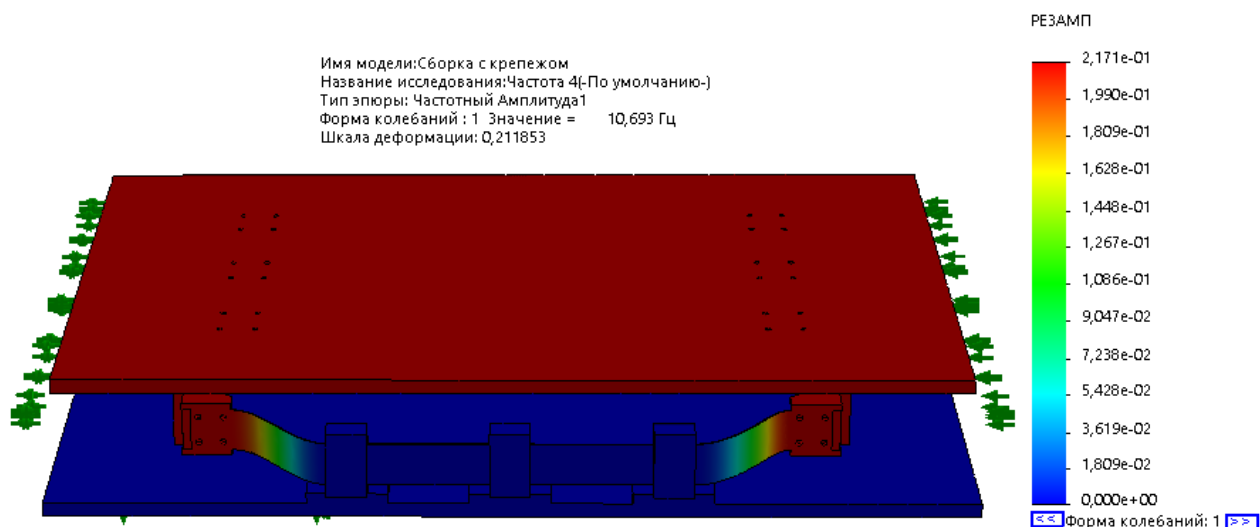


Рис. 3.11. Результат моделирования: довжина консолі 50 мм, маса вимірювального пристрою 10 кг

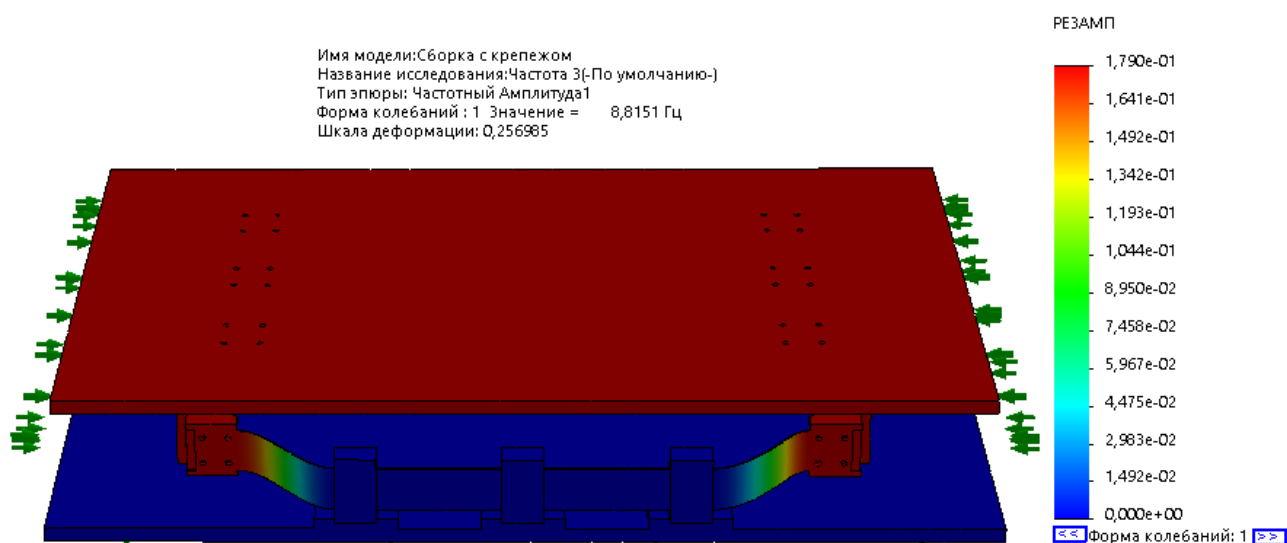


Рис. 3.12. Результат моделирования: довжина консолі 50 мм, маса вимірювального пристрою 20 кг

На рис.3.13 наведено графік зміни частоти власних коливань стенду в залежності від маси вимірювального приладу, побудований по результатам моделювання, представлених на рис.3.9–3.12.

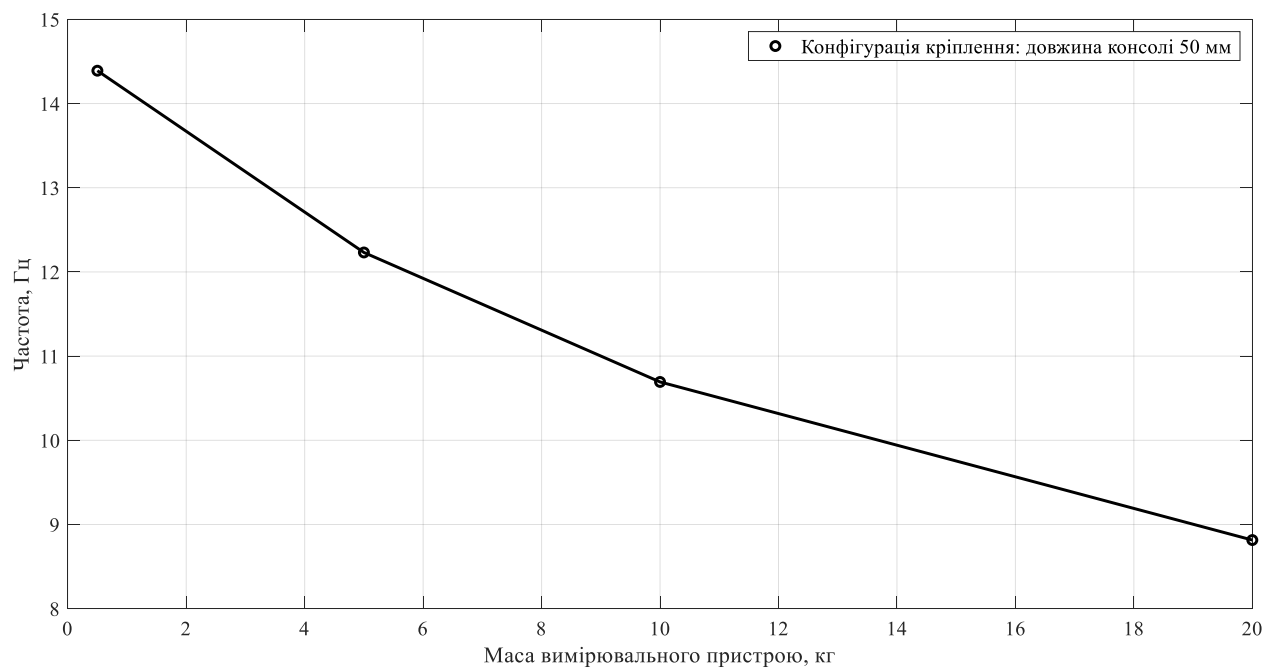


Рис. 3.13. Зміна частоти власних коливань стенду в залежності від маси вимірювального приладу (0.5, 5, 10, 20 кг)

На рис.3.14–3.17 показано результати моделювання власних коливань дослідного стенду при зміні маси вимірювального пристрою, довжина консолі при цьому дорівнює 129.6 мм.

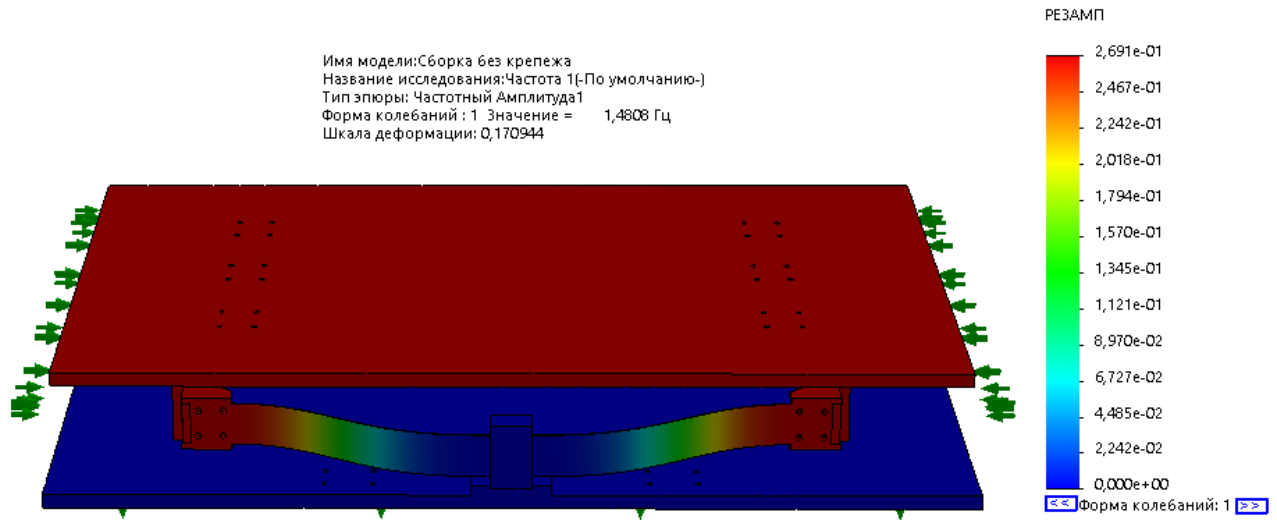


Рис. 3.14. Результат моделювання: довжина консолі 129.6 мм, маса вимірювального пристрою 0.5 кг

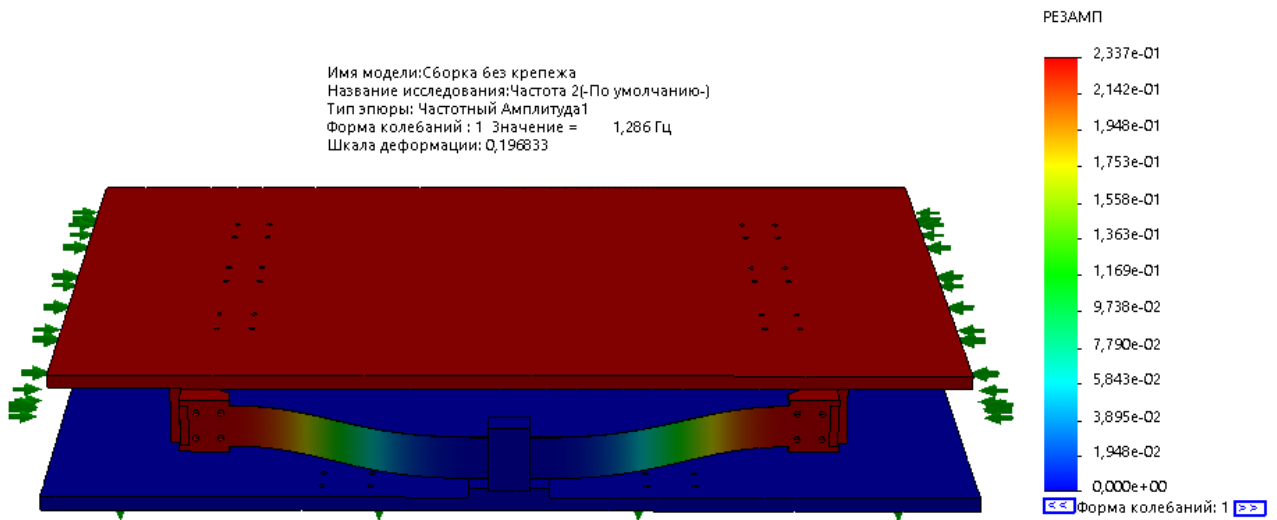


Рис. 3.15. Результат моделювання: довжина консолі 129.6 мм, маса вимірювального пристрою 5 кг

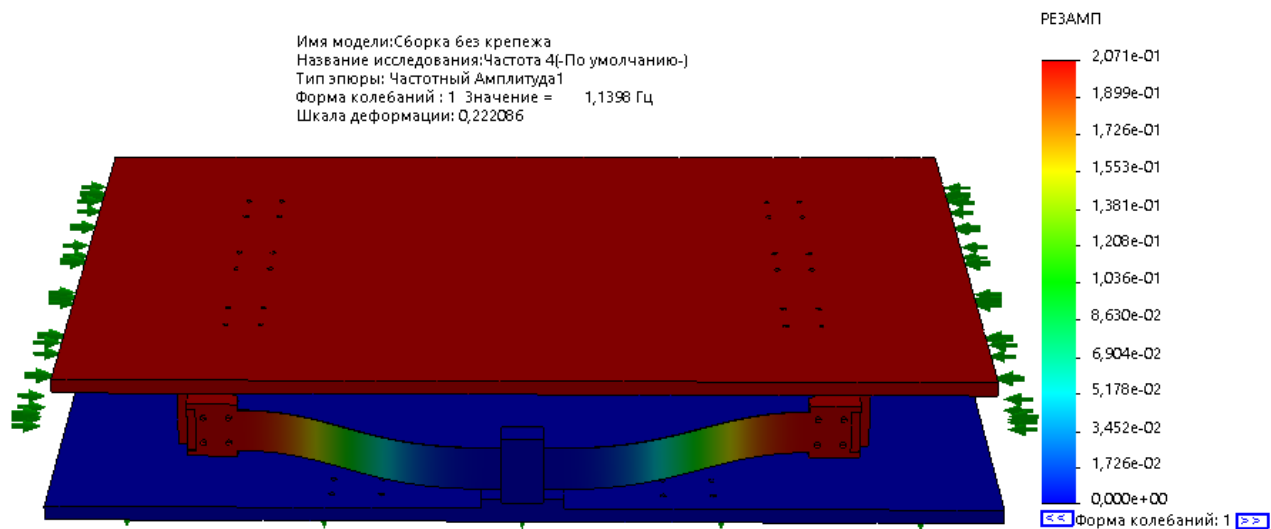


Рис. 3.16. Результат моделирования: довжина консолі 129.6 мм, маса вимірювального пристрою 10 кг

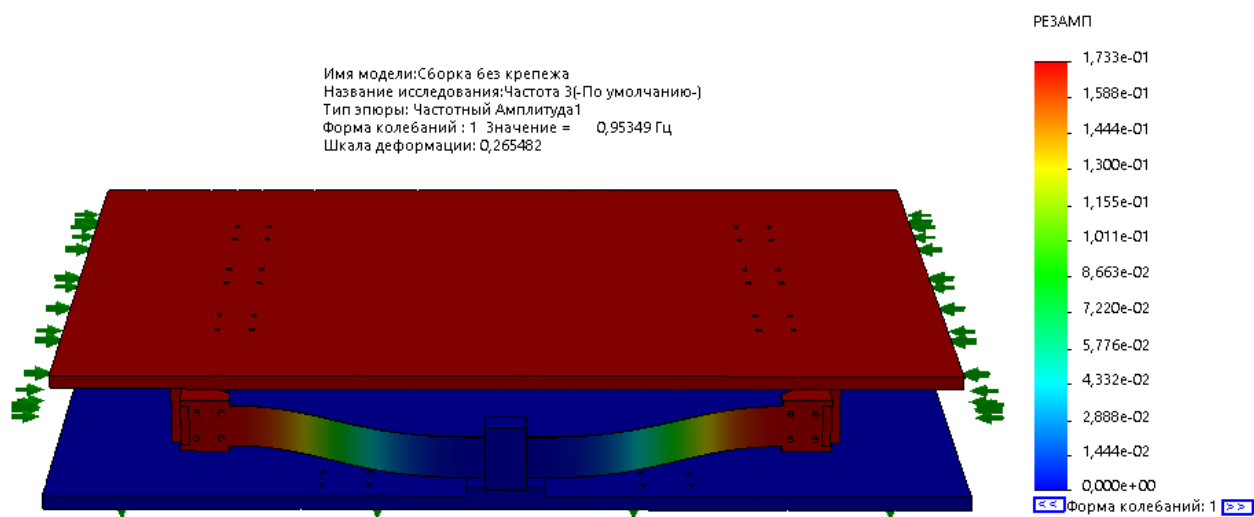


Рис. 3.17. Результат моделирования: довжина консолі 129.6 мм, маса вимірювального пристрою 20 кг

На рис.3.18 наведено графік зміни частоти власних коливань стенду в залежності від маси вимірювального приладу, побудований по результатам моделювання, представлених на рис.3.14–3.17.

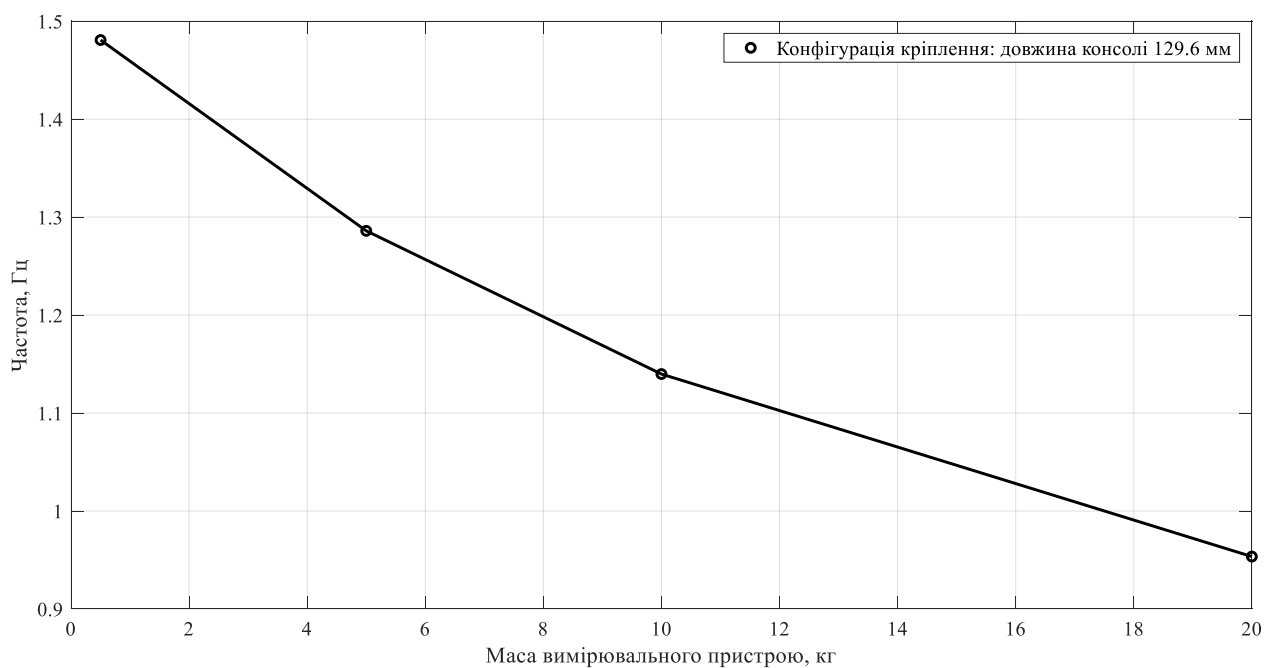


Рис. 3.18. Зміна частоти власних коливань стенду в залежності від маси вимірювального приладу (0.5, 5, 10, 20 кг)



## 3.2. Експериментальне дослідження роботи стану

### 3.2.1. Вертикальна вісь вимірювання

На рис.3.19–3.30 показано графіки з результатами вимірювання віброприскорення та вібропереміщення при вертикальних вимушених коливаннях дослідного стану для низьких, середніх та високих частот.

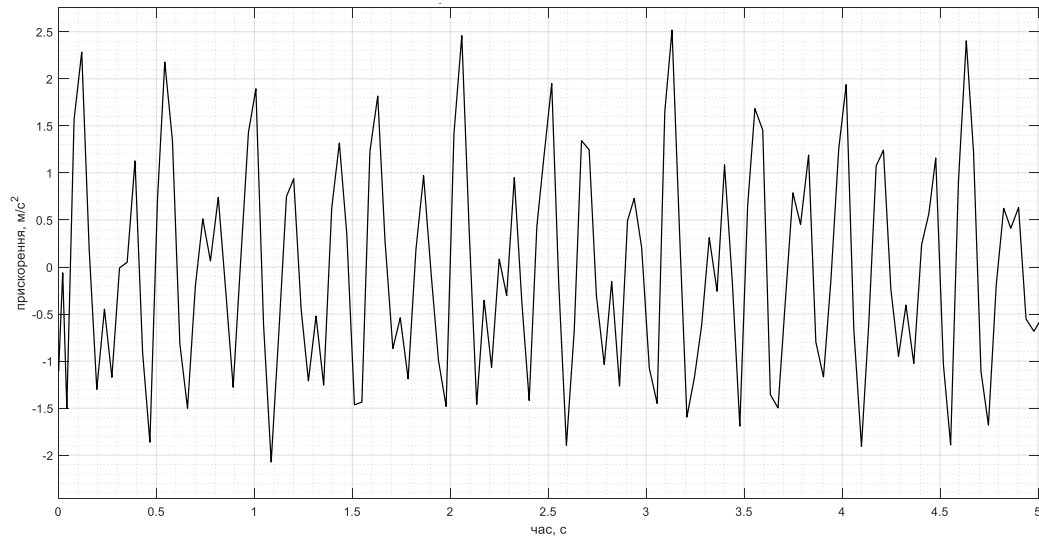


Рис. 3.19. Віброприскорення рухомої платформи стану при низьких частотах

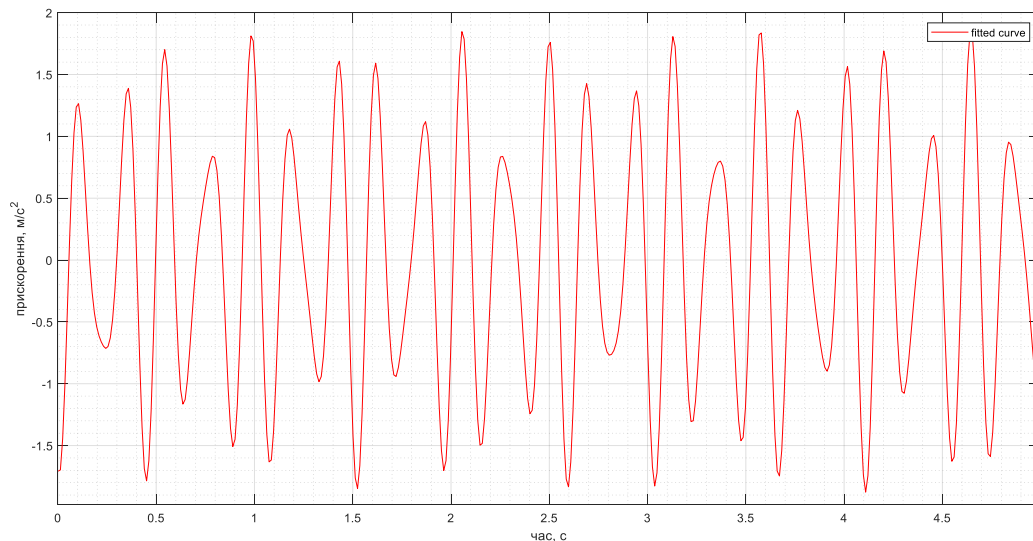


Рис. 3.20. Віброприскорення рухомої платформи стану при низьких частотах

$$A_{\omega} = 1.82 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad T = 0.215 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.215} = 4.65 \text{ Гц}.$$

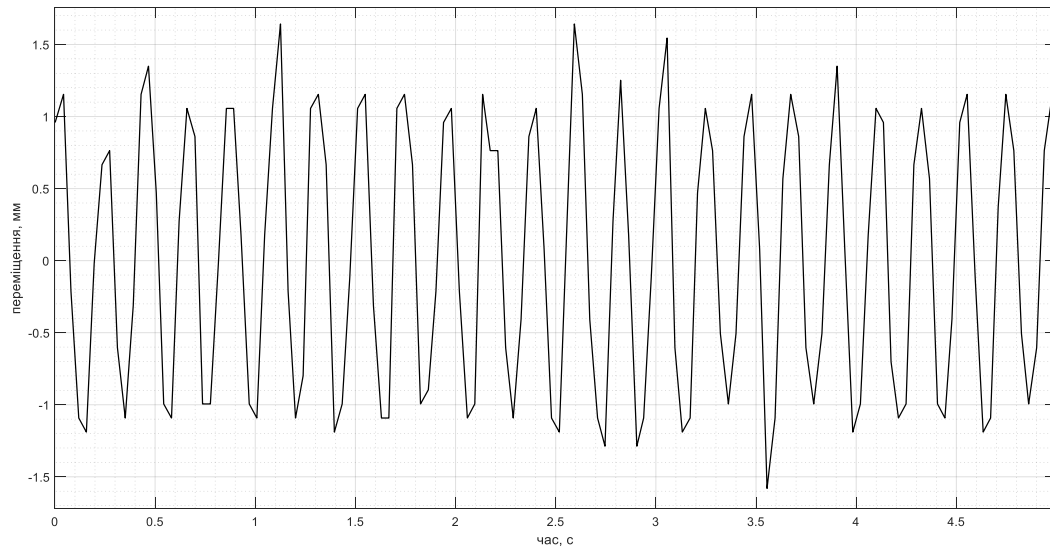


Рис. 3.21. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при низьких частотах

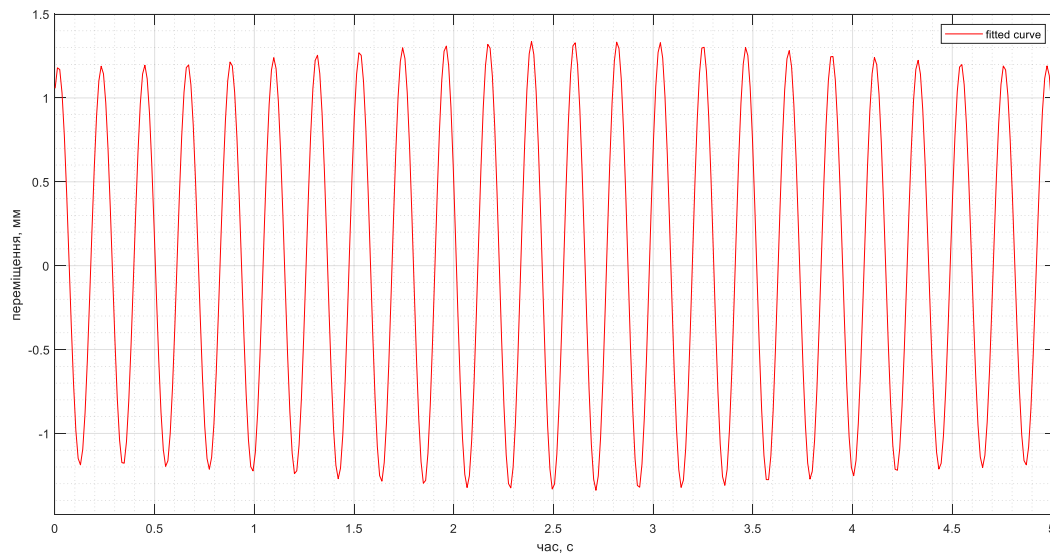


Рис. 3.22. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при низьких частотах

$$A = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.217 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.217} = 4.61 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.217} = 28.94 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot 28.94 = 0.036 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot 28.94^2 = 1.047 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

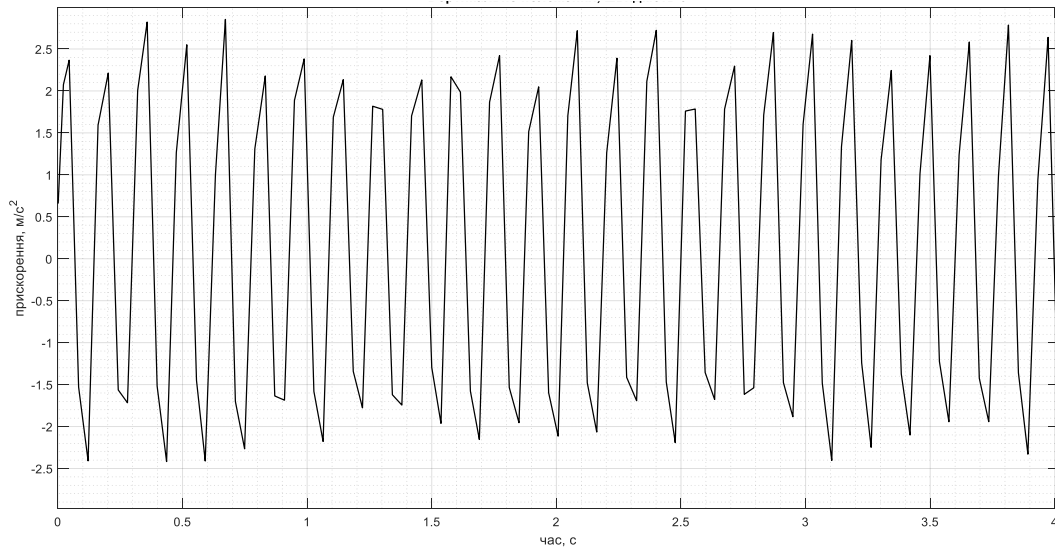


Рис. 3.23. Віброприскорення рухомої платформи стенду при середніх частотах

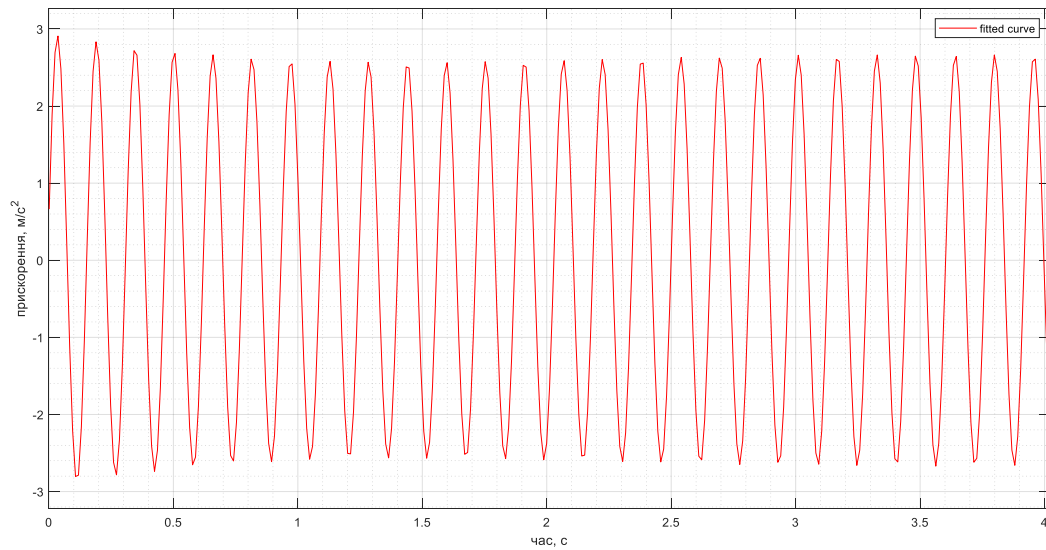


Рис. 3.24. Віброприскорення рухомої платформи стенду при середніх частотах

$$A_{\omega} = 2.65 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$T = 0.149 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.149} = 6.71 \text{ Гц.}$$

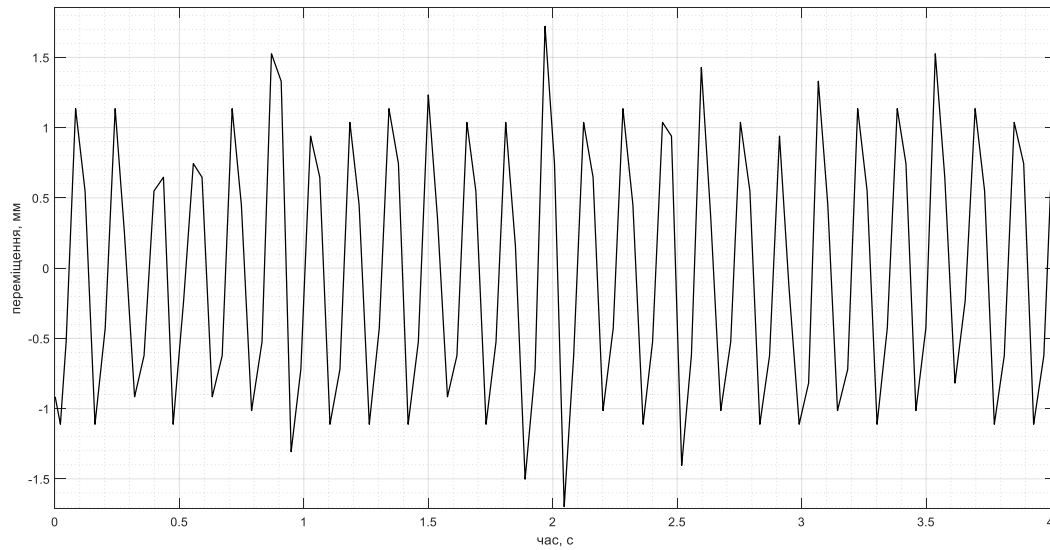


Рис. 3.25. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при середніх частотах

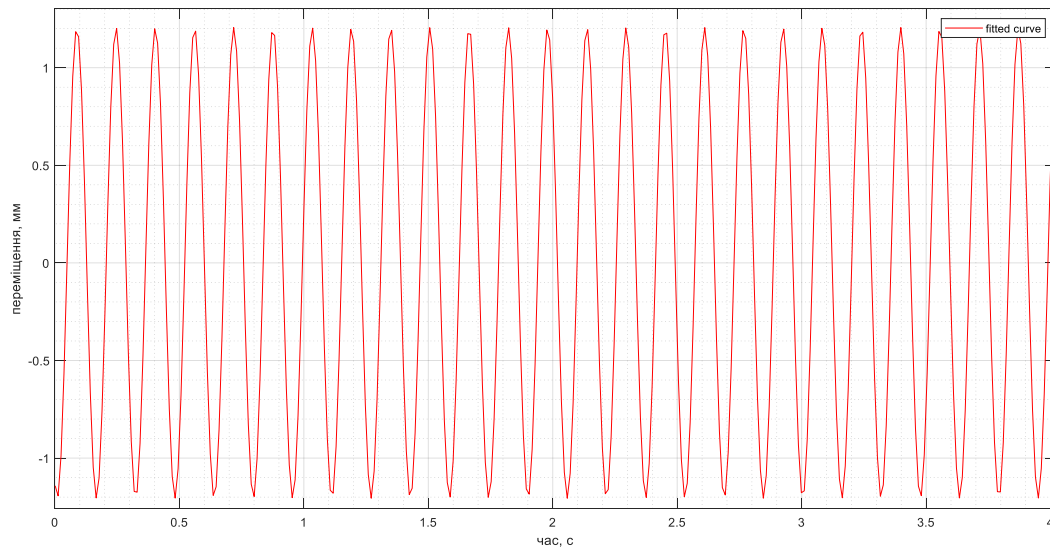


Рис. 3.26. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при середніх частотах

$$A = 1.51 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.157 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.157} = 6.37 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.157} = 40 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.51 \cdot 10^{-3} \cdot 40 = 0.06 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.51 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 = 2.416 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

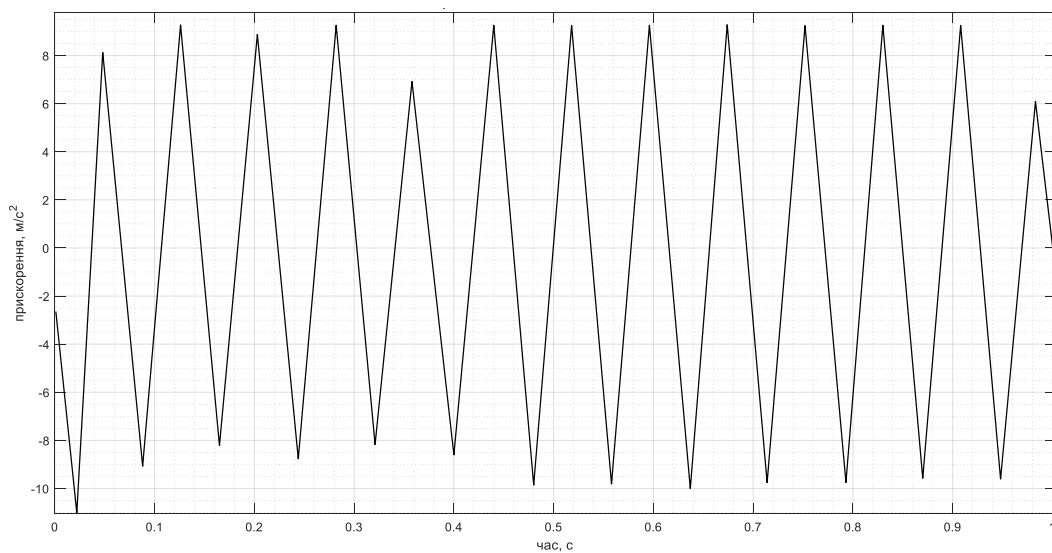


Рис. 3.27. Віброприскорення рухомої платформи стенду при високих частотах

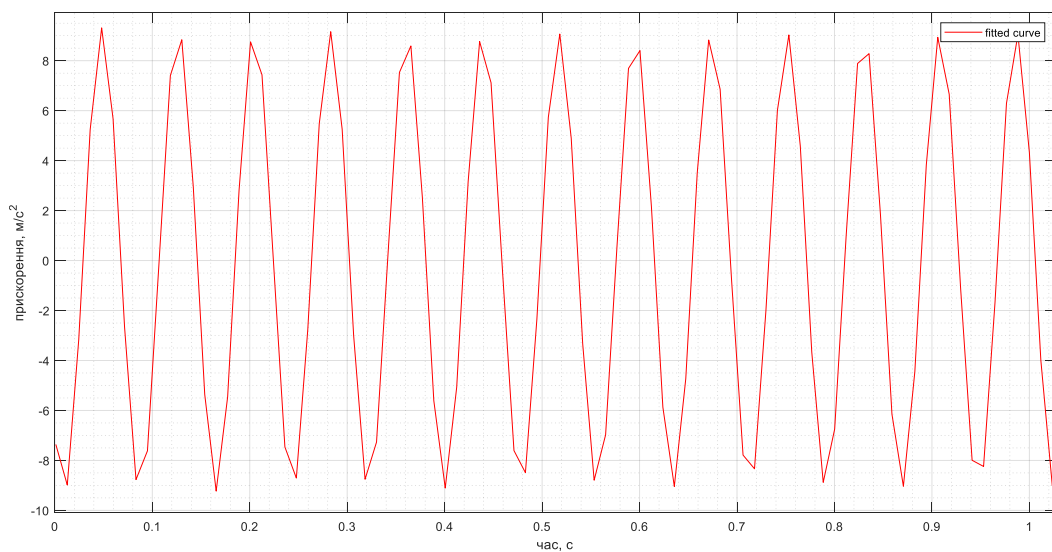


Рис. 3.28. Віброприскорення рухомої платформи стенду при високих частотах

$$A_{\omega} = 9.14 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$T = 0.078 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.078} = 12.82 \text{ Гц.}$$

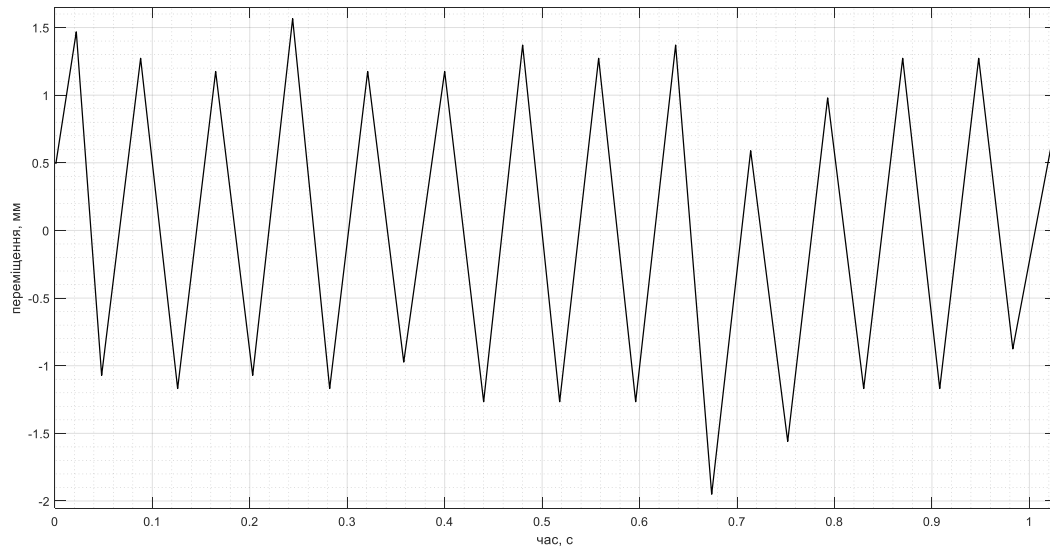


Рис. 3.29. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при високих частотах

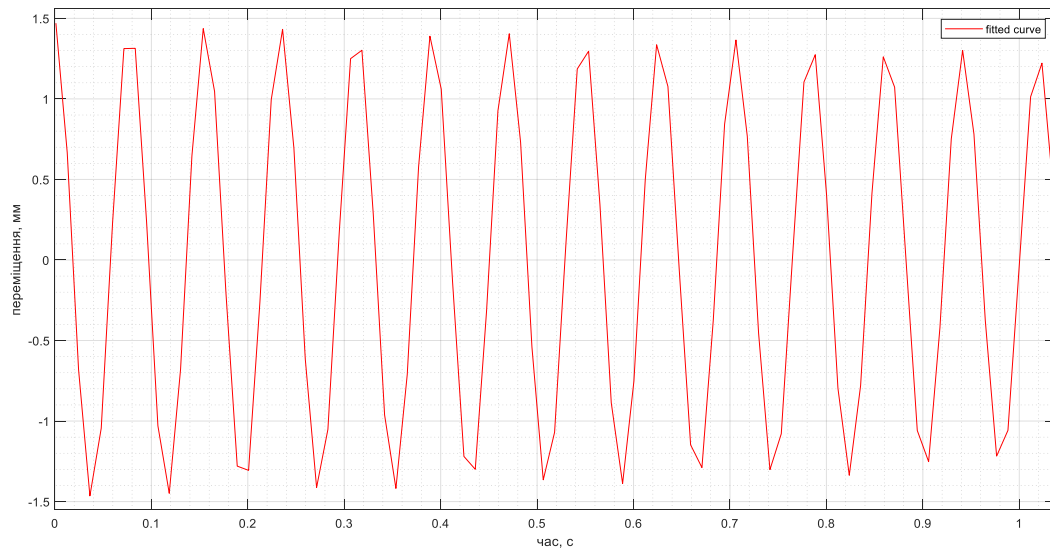


Рис. 3.30. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при високих частотах

$$A = 1.45 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.079 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.079} = 12.66 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.079} = 79.49 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.45 \cdot 10^{-3} \cdot 79.49 = 0.115 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.45 \cdot 10^{-3} \cdot 79.49^2 = 9.162 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

### 3.2.2. Горизонтальна вісь вимірювання

На рис.3.31–3.42 показано графіки з результатами вимірювання віброприскорення та вібропереміщення при горизонтальних вимушених коливаннях дослідного стенду для низьких, середніх та високих частот.

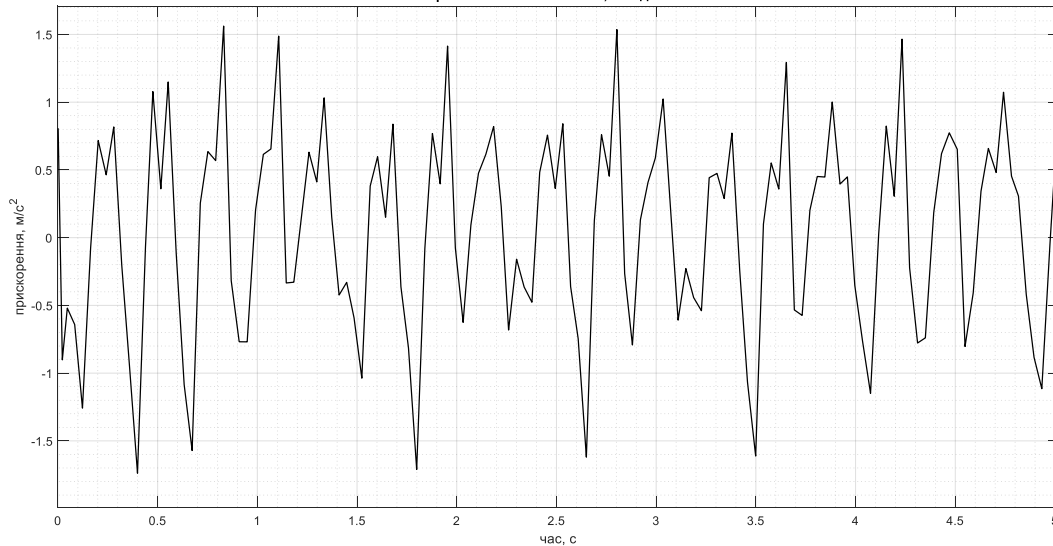


Рис. 3.31. Віброприскорення рухомої платформи стенду при низьких частотах

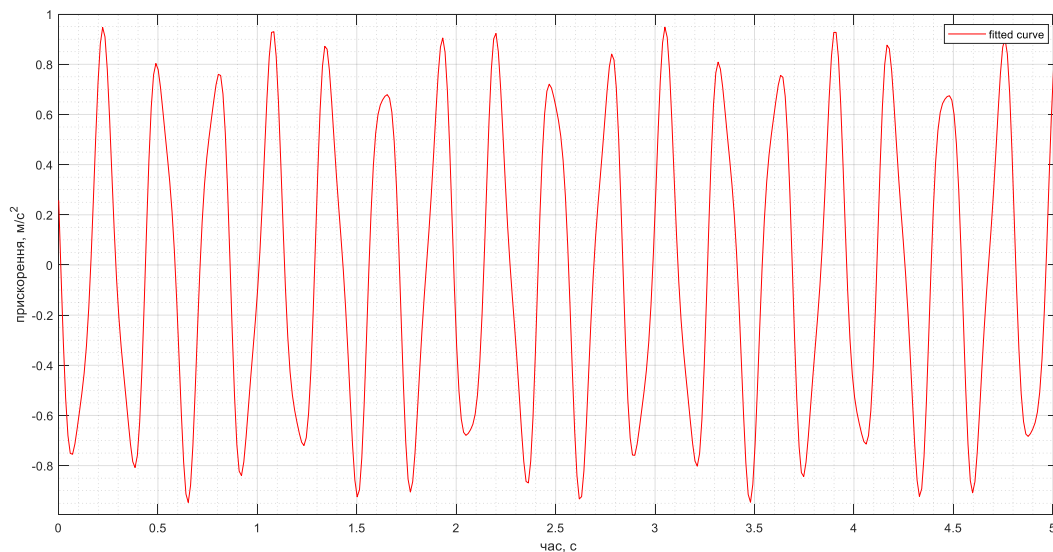


Рис. 3.32. Віброприскорення рухомої платформи стенду при низьких частотах

$$A_{\omega} = 0.98 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad T = 0.291 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.291} = 3.44 \text{ Гц}.$$

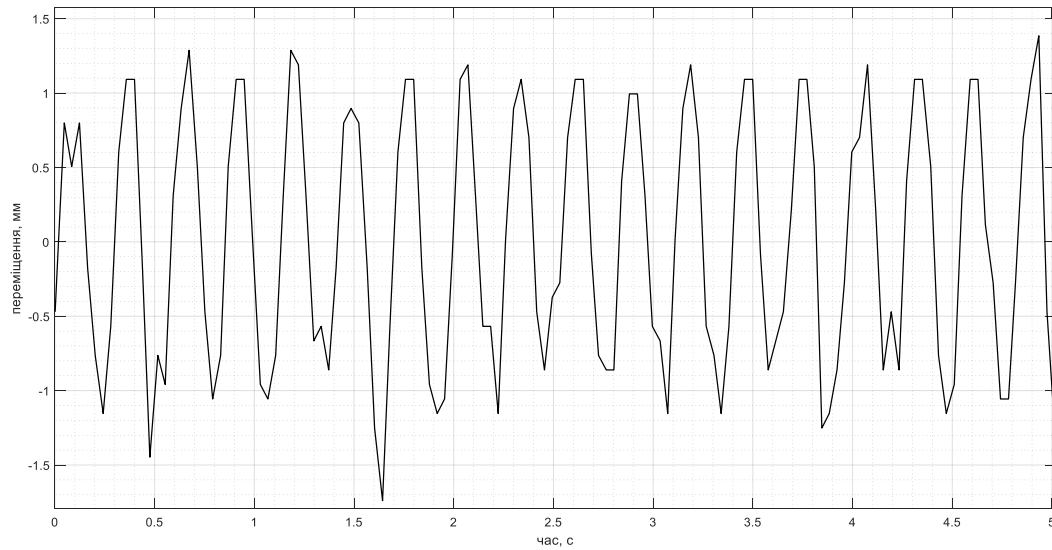


Рис. 3.33. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при низьких частотах

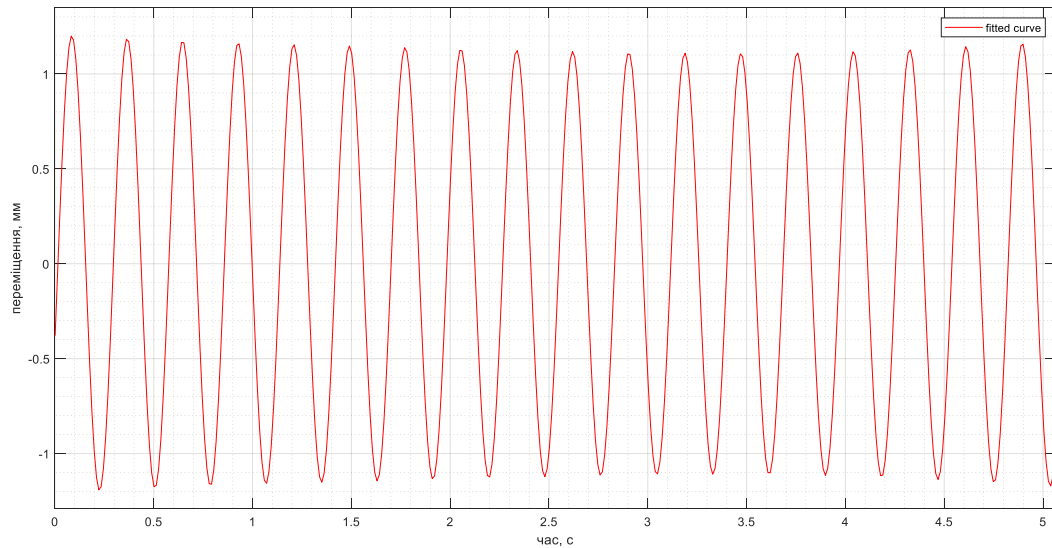


Рис. 3.34. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при низьких частотах

$$A = 1.23 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.269 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.269} = 3.72 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.269} = 23.35 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.23 \cdot 10^{-3} \cdot 23.35 = 0.029 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.23 \cdot 10^{-3} \cdot 23.35^2 = 0.671 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$



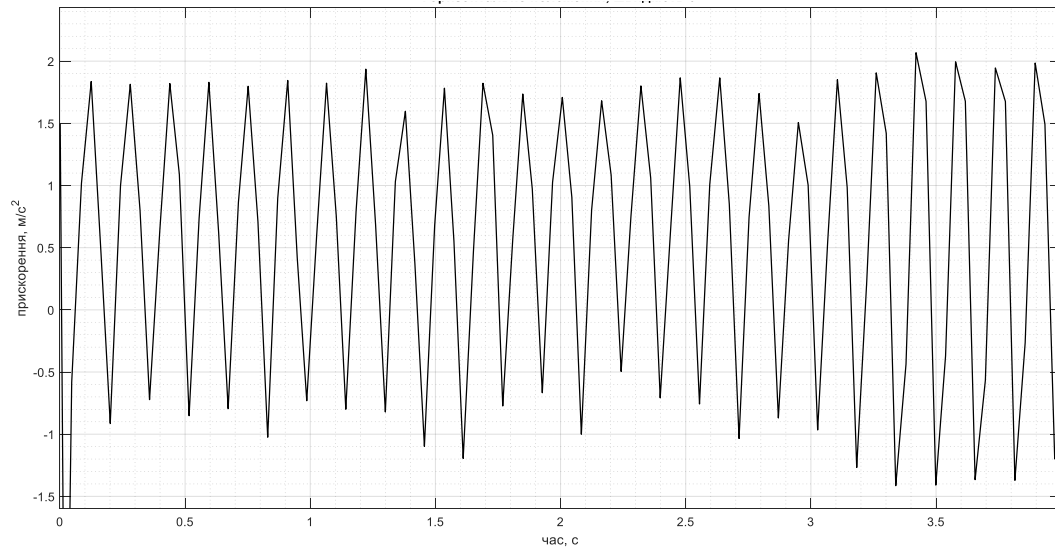


Рис. 3.35. Віброприскорення рухомої платформи стенду при середніх частотах

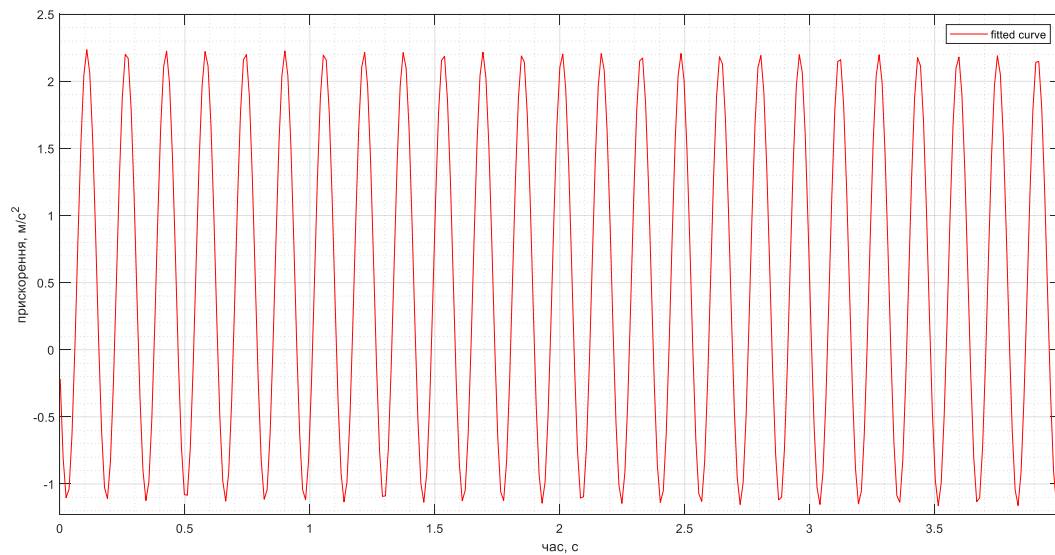


Рис. 3.36. Віброприскорення рухомої платформи стенду при середніх частотах

$$A_{\omega} = 1.72 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$T = 0.159 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.159} = 6.29 \text{ Гц.}$$

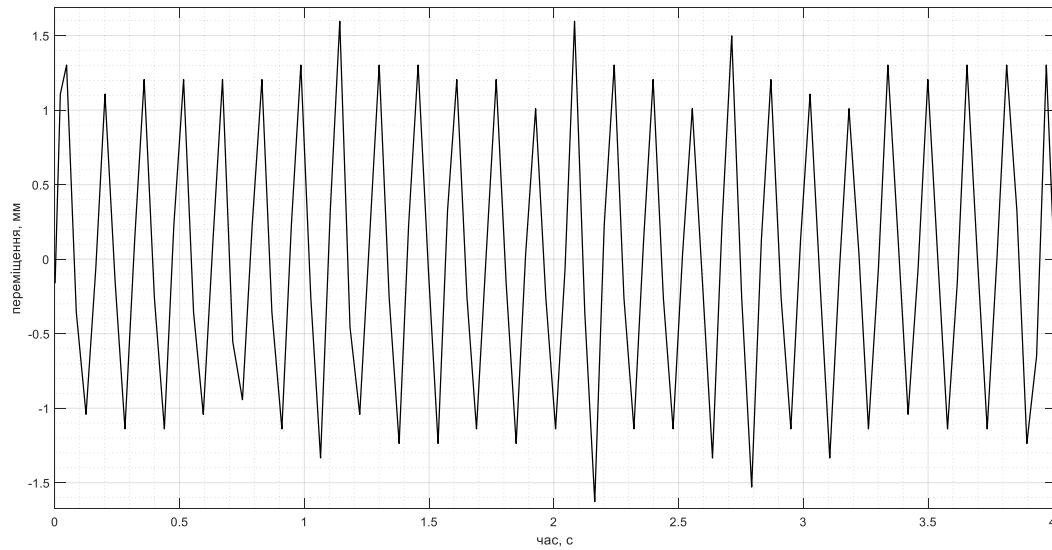


Рис. 3.37. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при середніх частотах

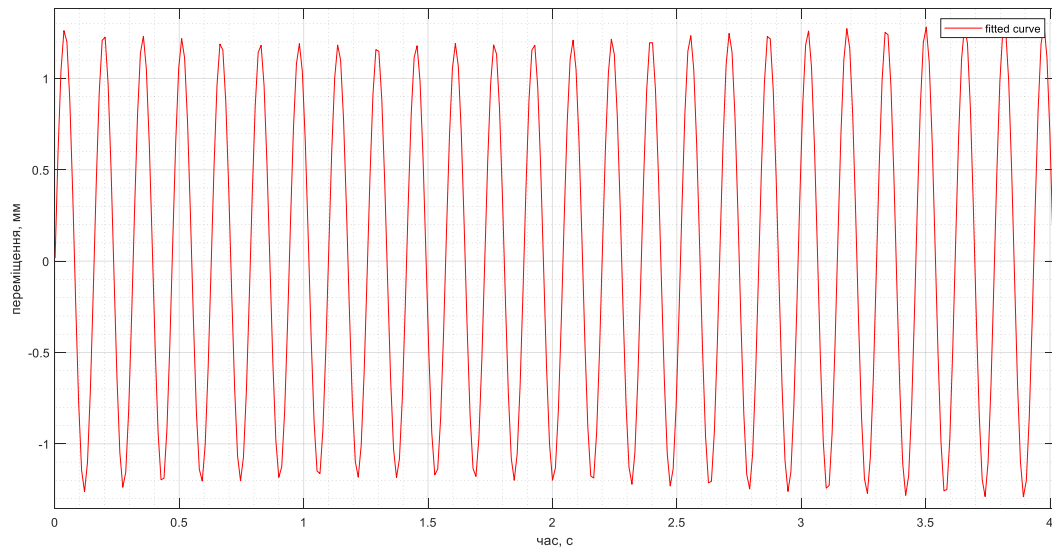


Рис. 3.38. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при середніх частотах

$$A = 1.21 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.154 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.154} = 6.49 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.154} = 40.78 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.21 \cdot 10^{-3} \cdot 40.78 = 0.049 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.21 \cdot 10^{-3} \cdot 40.78^2 = 2.01 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

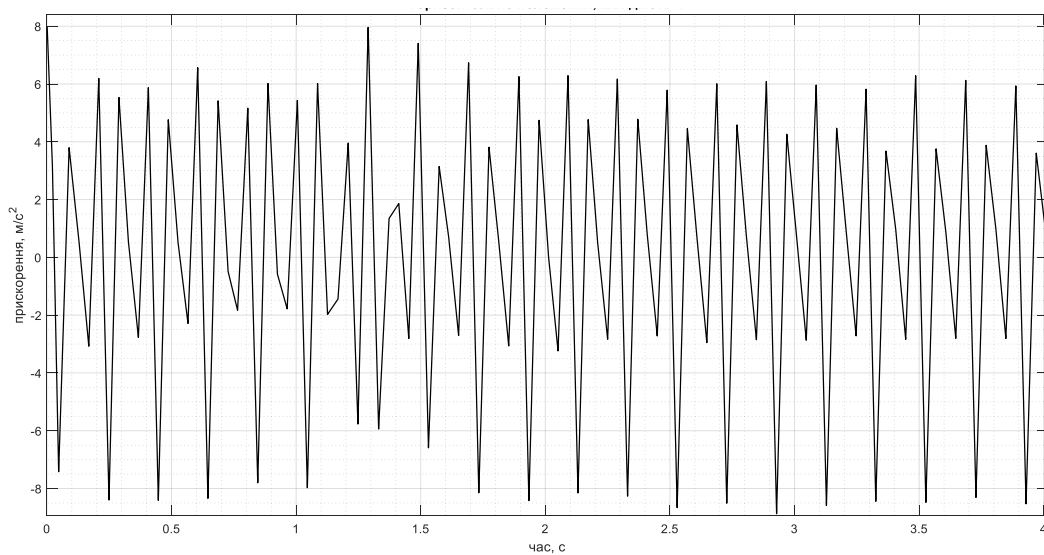


Рис. 3.39. Віброприскорення рухомої платформи стенду при високих частотах

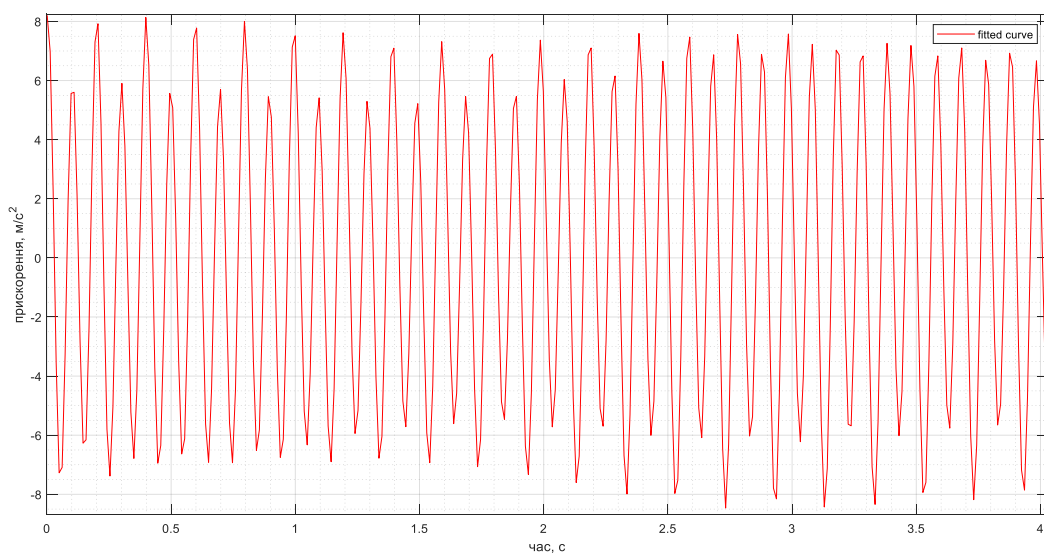


Рис. 3.40. Віброприскорення рухомої платформи стенду при високих частотах

$$A_{\omega} = 1.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$T = 0.099 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.099} = 10.1 \text{ Гц.}$$

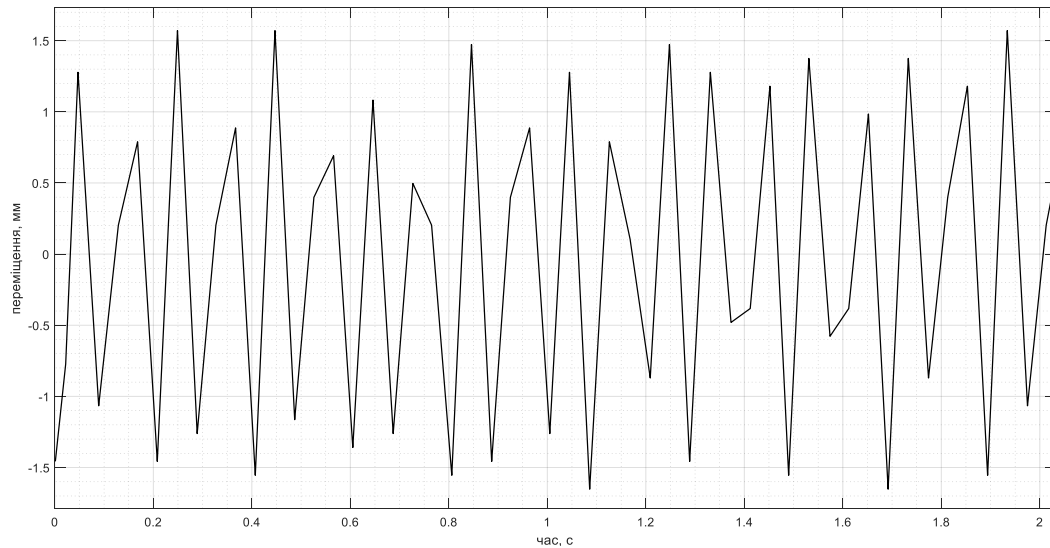


Рис. 3.41. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при високих частотах

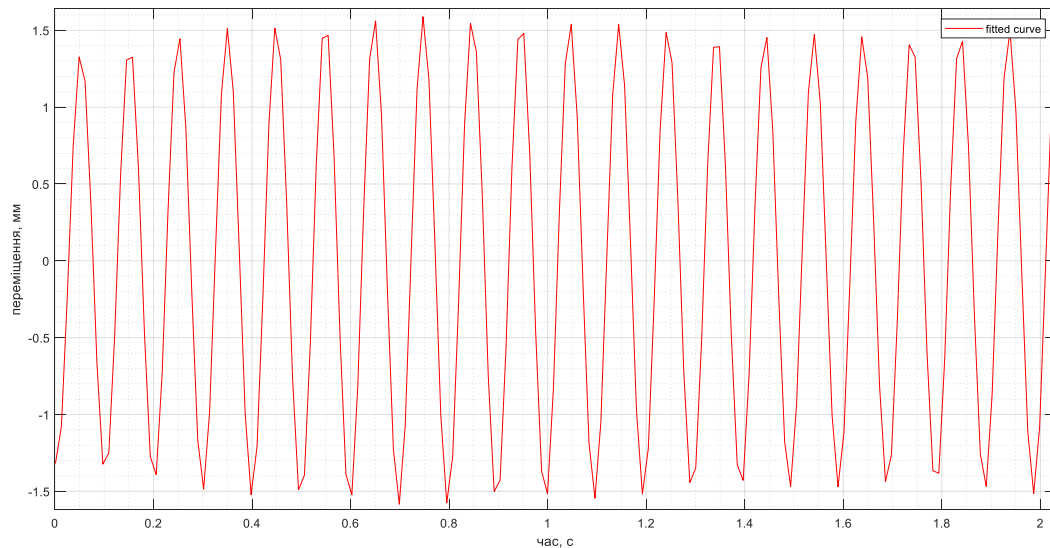


Рис. 3.42. Вібропереміщення рухомої платформи стенду при високих частотах

$$A = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$T = 0.101 \text{ с};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.101} = 9.91 \text{ Гц};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{0.101} = 62.18 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega = 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot 62.18 = 0.078 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$A \cdot \omega^2 = 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot 62.18^2 = 4.83 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

### 3.3. Висновки до розділу

В результаті проведення теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити висновок, що стенд повністю забезпечує необхідні параметри роботи, як в низькочастотній (до 4 Гц), так і в високочастотній областях (до 12 Гц).

За його допомогою представляється можливим проводити інженерні дослідження та калібрування сейсмодатчиків, в ході яких, в першу чергу, уточнювати значення масштабного коефіцієнта та проводити оцінку частотної характеристики приладів вимірювання сейсмосигналів.

## **РОЗДІЛ 4.**

### **РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ СТЕНД ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОПРИЙМАЧІВ»**

#### **4.1. Опис ідеї проекту**

Актуальність завдання пов'язана з необхідністю подальшого розвитку апаратури і алгоритмів функціонування для забезпечення динамічних випробувань, вібраційної діагностики та віброзахисту машин і устаткування, а, отже, з необхідністю проведення високоінформативних процедур управління, контролю і діагностики, що вимагають точних вимірювань вібраційних і ударних сигналів, створення контрольно вимірювального та випробувального обладнання, оснащення сучасними керівниками і вимірювальними системами існуючих і нових діагностичних, випробувальних і керуючих комплексів.

Найбільше значення набуває методичне та алгоритмічне забезпечення контрольно-вимірювального, діагностичного та випробувального обладнання, активний віброзахист прецизійного вимірювального обладнання і створення виконавчих прецизійних приводів, оскільки це дозволяє ефективно використовувати існуючу технічну базу і створювати нові ефективні системи контролю та управління.

Основна ідея при розробці нового каліброваного пристрою пов'язана з необхідністю об'єднати як вертикальне, як і горизонтальне переміщення платформи пристрою в одному варіанті конструкції апаратури, оскільки каліброване пристрій (віброплатформа) застосовується в основному для калібрування горизонтальних складових сейсмометрів.

За рахунок великого розміру майданчика на ній можливе розміщення відразу близько 20 сейсмометрів (для мікросейсмічних районування) для тестування їх технічного стану.

Це каліброване пристрій здійснює безперервне загасаюче коливання в горизонтальній площині. Використовувати такий вхідний сигнал для розрахунку параметрів передавальних функцій досить складно через виключно чисельного методу виконання цієї процедури. Очевидно, що чим ближче значення вхідного сигналу сейсмометра на калібрує його пристрої до імпульсного теоретичного, тим простіше стає математичний апарат його рішення для отримання строго обчисленої передавальної функції.

Таблиця 4.1.

## Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Вібраційний стенд та модуль вимірювання для забезпечення динамічних випробувань	Приладо- та машинобудування	1. Наявність вертикального руху; 2. Можливість калібрування зразу декількох вимірювальних модулів; 3. Математична точність визначення точного розрахунку функцій вимірювального модуля; 4. Підвищення довговічності і надійності виробів; 5. Оптимізація робочих центрів; 6. Виготовлення виробів в заданий термін.
	Лабораторії для тестування, калібрування і вивчення сейсмоприймачів	
	Підприємства по виготовленню різних типів виробів	1. Покращення якості продукту; 2. Збільшення попиту на продукт; 3. Прискорення виробництва виробів.
	Оборона	Вимірювальний модуль визначає прискорення під час великих навантажень та перенавантаженні.
	Електроніка	Використання модуля як вимірювача прискорення в мобільних та портативних пристроях, як наукового призначення так і масового: смартфони, ПК та ноутбуки.

В межах підпункту 4.1 послідовно проаналізовано та подано у вигляді таблиць: зміст ідеї та можливі напрямки застосування, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів, а також основні вигоди, що можуть отримати користувачі товару та чим він відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Отже, пропонується вібраційний стенд та модуль вимірювання для забезпечення динамічних випробувань, як пристрій для калібрування і метрологічної повірки сейсмоприймачів, який автоматизує вібраційні випробування з метою скорочення часових витрат, підвищення точності завдання впливів, достовірності вимірювань і наочності подання інформації за рахунок мінімізації впливу людського фактору на процес проведення випробувань. Модуль вимірювання полягає з себе мікромеханічний акселерометр, який характеризується малою масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації і на кілька порядків меншою вартістю ніж їхні традиційні аналоги. Споживачами є виробники оборонної промисловості, а саме ракето- та авіабудування, виробники електроніки наукового та масового виробництва та використання в малогабаритних системах орієнтації та навігації. Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;



– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.

## Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Конкурент 1. Мобільний вібростенд BCB-131 Ex	Конкурент 2 SEV 180 з підсилювачем DSA4	Конкурент 3. Вібростенд з збільшеним розміром вібропереміщення, EMIC			
1	Торгівельна марка	немає	є	є	є	+		
2	Максимальна маса досліджуваних датчиків, кг	До 20кг	До 1 кг	До 8 кг	До 6 кг			+
3	Частотний діапазон, Гц	0,1–10	45;64;79.6	DC...3500	8 - 35	+		
4	Габаритні розміри стенду	150x200x x100 мм	240x235x x290 мм	725x500x x795 мм	300x250x x210 мм			+
5	Маса стенду	25 кг	13 кг	850 кг	120 кг		+	
6	Динамічний діапазон зміщень	До ±15мм	0,2-25мм	38мм	до 100,0 мм		+	
7	Наявність вертикальної осі	є	немає	немає	немає			+

8	Можливість розміщення зразу декількох модулів вимірювання	є	немає	немає	немає			+
9	Можливість зміни власної частоти коливань	є	є	немає	немає		+	

Висновки: Після порівняння характеристик проекту з головними конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Головною перевагою при розробці нового універсального пристрою для перевірки працездатності та інженерного дослідження сейсмодатчиків з вертикальною та горизонтальною осями чутливості пов'язана з необхідністю об'єднати в одному варіанті конструкції як вертикальне, так і горизонтальне переміщення рухомої платформи пристрою. Також передбачається, що за рахунок використання досить великого розміру рухомої платформи, на ній можна буде розміщувати одразу 2-3 сейсмометра для одночасного проведення досліджень.

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Даний підрозділ спрямований на аудит технології (методики розрахунків), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

## Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка нового універсального пристрою для перевірки працездатності та інженерного дослідження сейсмодатчиків з вертикальною та горизонтальною осями чутливості.	Поєднання горизонтальних і вертикальних переміщень рухомої платформи в одному пристрої досягається за рахунок використання симетричної конструкції розташування пружних елементів та додаткових напрямних, в конструкції яких використовуються прецизійні шарикопідшипники.	Наявна	Доступна
2.	Підвищення точності роботи	Використання сучасних та точних модулів вимірювання	Наявна	Доступна
3.	Компенсація впливу дестабілізуючих факторів	Впровадження системи коригуючих датчиків до вимірювального модуля	Наявна	Доступна
4.	Аналіз та управління динамічними процесами	Використання структурних методів забезпечення динамічних процесів вимірювання та алгоритмів функціонування при розробці автономних регістраторів	Наявна	Доступна
5.	Зменшення часу на процес вимірювання	Впровадження алгоритмів фільтрації та компенсування похибок	Наявна	Доступна
6.	Інтеграція з іншими системами оцінки уявного прискорення та кутів орієнтації	Використання готових протоколів обміну даними	Наявна	Доступна
7.	Зменшення масо-габаритних показників	Використання передових технологій виробництва приладів	Наявна	Доступна
8.	Сертифікація для продажу та використання в	Проходження наукової сертифікації	Наявна	Доступна

	наукових міжнародних проектах			
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Ідею проекту можна створити. Технологія реалізації ідеї спирається на інноваційність підходу та включенні в вимірювальний модуль системи коригуючих датчиків, що дає змогу компенсувати дестабілізуючі фактори.				

Висновки: Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що наш проект можна реалізувати тому що всі необхідні технології реалізації даних ідей наявні. Щоб вийти на ринок і виділятися від конкурентів потрібно розширити сертифікацію, сферу використання та подальший прибуток.

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В цьому розділі визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації. Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4.

##### Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	9
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	290000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	7,8 %

Висновки: За попереднім оцінюванням ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт, тому робим висновок, що ринок є привабливим для входження, хоча на ньому вже існують і іноземні фірми, які працюють багато років і роблять продукцію хорошої якості, але за рахунок нової технології і переваг, які вона надає продукт є конкурентоспроможним. Мала кількість гравців свідчить про високий поріг входу на ринок через високу наукоємність ніші, однак з іншої сторони тут мала конкурентність, що при умові вибору правильного вектору розвитку, акцентуючи увагу на сервісній підтримці, високій точності, нижчій ціні, унікальності систем та національному виробникові, може зіграти в плюс проекту і швидкому виходу на ринок. Високий процент рентабельності дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку системи. Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.5.

## Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Вимірювання прискорення у реальному часі	Приладо– та машинобудування	Особливості, викликані зі специфікою проведення дослідів, необхідність модифікування програмно-алгоритмічного забезпечення, інтеграція із існуючими системами	Швидкість роботи; Точність; Надійність; Можливість комплексування з іншими системами Висока стабільність результатів
		Електроніка.		
		Ракето– та авіапромисловості		

Висновки: формування ринку визначається потребою швидкого і точного вимірювання прискорення у реальному часі та подальший аналіз даних. Основними споживачами цього продукту є сфери, що тією чи іншою мірою

стосуються дослідження рухового апарату, а саме сфера приладо- та машинобудування, електроніки, ракетобудування та авіапромисловості. Заважаючи на це, головними вимогами до товару є швидкість роботи, комплексування з іншими приладами, точність, надійність та висока стабільність результатів.

Таблиця 4.6.

## Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів
2	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4	Вартість комплектуючих	Підвищення закупівельної вартості комплектуючих	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази
5	Старіння	Поява модернізованої продукції	Моніторинг трендів, постійна модернізація згідно з вимогами ринку
6	Патентні позови	Позови від компаній конкурентів	Відстоювання прав компанії.

Висновки: В таблиці 4.6 було визначено фактори загроз які перешкоджають ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактори щоб звести до мінімуму його вплив. Головним фактором загроз є конкуренція. Вже існуючі товари на ринку мають певну репутацію та великі об'єми виробництва. Конкуренти здатні демпінгувати ціни або впровадити подібну систему для отримання нових клієнтів свого товару. Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (табл. 4.7).

Таблиця 4.7.

## Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення попиту	Різке збільшення зацікавленості до системи	Підвищення виробництва. Модернізація продукту, розробка нових ідей
2	Необхідність до інтеграції	Необхідність додати можливість розширення системи	Компанія може створити додаткові можливості системи на замовлення
3	Освоєння нових сфер	Система використовується у сферах, що не розглядалися виробником	Створення спеціальної робочої групи задля модернізації приладу для виконання поставлених вимог
4	Індивідуальне замовлення	Клієнт потребує додання нових специфічних додатків	Оцінка затрат і вигоди компанії в даній ситуації. Погодження умов можливого контракту.
5	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків
6	Можливість створення сайту з реалізації товару	Можливість придбати продукт на віддаленій відстані	Зробити акцент на якості продукції

Висновки: В таблиці 4.7 було визначено фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого продукту та вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор. Сфера використання таких систем є молодим, тому ринок клієнтів постійно зростає. Збільшення зацікавленості в товарі призведе до різкого збільшення об'ємів виробництва та продажів, що дасть поштовх до нових вдосконалення. Це досягається шляхом рекламування та освоєння нових сфер. Також можливі індивідуальні партії для окремих замовників, для включення особливих метрологічних якостей в систему. В таблиці 4.8 буде проаналізовано ринок збуту нашого продукту і визначено загальні риси конкуренції на ньому.

Таблиця 4.8.

## Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	<ul style="list-style-type: none"> <li>• відповідність ринку</li> <li>• прогнозування випереджати існуючі технології</li> <li>• висока якість</li> <li>• конкурентна ціна</li> </ul>
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Наявність замовників із інших держав	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Міжнародний ринок</li> <li>• Створення сайту на різних мовах</li> <li>• Реклама продукції</li> </ul>
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Використання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Товар, що пропонується є одного виду	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку</li> <li>• Адаптивність до умов ринку</li> </ul>
5. За характером конкурентних переваг: цінова	Вартість залежить від комплектації та функціоналу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю: марочна	Вибір постачальника по бренду	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Створення власної марки</li> <li>• Розкрутка бренду, його рекламування</li> </ul>

Висновки: На ринку присутня чиста конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний із міжгалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – видова. Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.



Таблиця. 4.9.

## Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Мобільний вібростенд VCB-131 Ex	Вібростенд з збільшеним розмахом вібро-переміщення, ЕМІС	Двигуни Makita	Метрологічні фірми	Оптичні системи
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою за рахунок відсутності аналогічної системи	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники мають не диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару.	Обмежень практично немає, оскільки мають різні обмеження по використанню

Висновки: Отже, відповідно до наведеного вище аналізу, головними силами, які діють на конкуренцію в галузі є постачальники і споживачі. Також все більшого значення набуває інтенсивність конкуренції між існуючими конкурентами. Таким чином в межах структурного підходу до аналізу конструкції тип конкуренції – чиста конкуренція. Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки це важко зробити через те, що, проєкт не впроваджено в життя у повному обсязі, тому можна лише дати попередню оцінку конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10.

## Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Надійність	Використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю
2	Простота	Простота у використанні для користувача робить систему привабливою для клієнта.

3	Адаптивність	Можливість гнучкого налаштування під конкретні задачі
4	Модульність	Можливість комплексування із додатковими системами фіксації показників орієнтації.
5	Ціна	Опрацювання відгуків клієнтів, вдосконалення відповідно до їх пропозицій та за можливістю зниження ціни на продукт

Висновки: В таблиці 4.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 4.9 визначили та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту. Оцінено основні фактори конкуренто спроможності. Підвищення надійності системи досягається шляхом використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю. Простота у використанні приладу та налаштуванні робить його більш привабливим для клієнта через те, що необхідно тратити мінімум часу на налагодження та запуск. Адаптивність та модульність відкривають широкий спектр використання приладу у поєднанні із іншими системами.

Таблиця 4.11.

#### Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Xsens						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	19							+3
2	Простота	20				+			
3	Адаптивність	17						+2	
4	Модульність	17				+			
5	Ціна	18						+2	

Висновки: Спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 4.9) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує, що сильними сторонами є надійність, простота, можливість до адаптації з роботою із іншими системами та ціна.

Таблиця 4.12.

## SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вища завадостійкість</li> <li>• простота використання</li> <li>• адаптивність</li> <li>• простота використання,</li> <li>• портативність,</li> <li>• можливість до комплексування</li> <li>• максимальна маса досліджуваних датчиків</li> <li>• габаритні розміри стенду</li> <li>• наявність вертикальної осі</li> <li>• можливість розміщення зразу декількох модулів вимірювання</li> <li>• приємна ціна</li> </ul>	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• своєчасне оновлення математичної бази,</li> <li>• відносно нове ПЗ може мати недоліки</li> </ul>
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вихід на міжнародний ринок</li> <li>• Збільшення попиту</li> <li>• Необхідність до інтеграції</li> <li>• Освоєння нових сфер</li> <li>• Індивідуальне замовлення</li> <li>• Співпраця з конкурентами</li> <li>• Можливість створення сайту з реалізації товару</li> </ul>	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• конкуренція,</li> <li>• старіння,</li> <li>• економічна нестабільність,</li> <li>• Якість продукту,</li> <li>• Вартість комплектуючих,</li> <li>• Патентні позови</li> <li>• сертифікація.</li> </ul>

Висновки: В таблиці 4.12 проводимо перелік сильних та слабких сторін проекту, а також ринкових загроз та ринкових можливостей який складаємо на 105 основі факторів загроз і можливостей складений раніше. Ринкові загрози та

можливості на відміну від факторів ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. На основі SWOT–аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтований оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 4.13.

## Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	6 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Середня	10 місяців
3	Суперництво	Нижче середнього	15 місяців

Висновки: Проводимо аналіз розроблених нами альтернатив ринкового впровадження і з зазначених альтернатив обираємо ту, яка має найбільшу ймовірність отримання ресурсів, а також є найшвидшою в реалізації. Отже обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартап-проекту.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14.

##### Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні підприємства	Готові	Середній попит	висока	середня
2	Приватні підприємства	Готові	Високий попит	висока	складна
3	Ракетобудівництво	Готові	Високий попит	низька	складна
4	Авіапромисловість	Готові	Високий попит	низька	складна
5	Виробники електроніки	Готові	Середній попит	висока	просто
6	Робототехніка	Не готові	Середній попит	низька	середня
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Ракетобудівництво та авіапромисловість потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішної реклами є можливість зайняти нішу. На даний момент буде важко конкурувати з уже існуючими товарами модулями вимірювання: енкадерами, оптичним системами у сфері виробників електроніки.					

Висновки: За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано цільові групи, для яких будемо пропонувати свою програму для оптимізації робочих центрів та визначили свою стратегію охоплення ринку: стратегію недиференційованого маркетингу через існування на ринку більш сильніших гравців. Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця. 4.15.

## Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Індивідуалізм	Стратегія недиференційовано го маркетингу	Адаптація до вимог ринку Використання новацій Генерування ноу-хау	Стратегія спеціалізації

Висновки: Дана стратегія була обрана через існування на ринку відомих гравців з великим авторитетом та тісними зв'язками з ключовими покупцями. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації, щоб отримати певний авторитет і ім'я на ринку та зайняти певну стабільну нішу на ринку.

Таблиця 4.16.

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде вдосконалювати наявні зразки	Стратегія виклику лідера

Висновок: Оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, за базову стратегію конкурентної поведінки можливо обрати стратегію виклику лідеру. Це є можливим на фоні використання інноваційних методів підвищення точності алгоритмічного

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

Таблиця 4.17.

## Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Швидкість роботи	Стратегія спеціалізації	До слідження та розвиток	Високошвидкісна, легкість, надійність
2	Точність	Стратегія спеціалізації	Впровадження інновації	Високоточна
3	Можливість комплексування з іншими системами	Стратегія спеціалізації	Обслуговування	Здатна до комплексування
4	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	Високоточна
5	Робота в важких експлуатаційних умовах	Стратегія спеціалізації	Впровадження інновації	Використання в важких експлуатаційних умовах

Висновки: Завдяки використанню інноваційних методів підвищення точності, у клієнта повинні виникнути асоціації з точною і при цьому швидкою системою, яка працює в будь-яких експлуатаційних та в польових умовах; гнучкістю налаштування та компенсування, можливості після продажного обслуговування та високої якості виготовлення.

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

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18.

##### Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність виміру прискорення у реальному часі	Відносно дешева та надійна система виміру прискорення	Ціна, надійність, точність, швидкість вимірювання, простота, підтримка, обслуговування, малогабаритність

Висновки: За рахунок визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого зацікавленого в продукції клієнта.

Таблиця 4.19.

##### Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Засіб дає можливість користувачеві точно та швидко оцінити відносне положення тіла в просторі за допомогою виміру прискорення, та з подальшою обробкою даних безпосередньо визначити місцерозташування користувача, або пристрою на якому встановлений засіб.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Малогабаритність	М	Тх
	Швидкість роботи	Нм	Тх
	Точність	Нм	Тх
	Надійність	Нм	Тх
	Вартість	М	Е
Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація IEEE.			



	Пакування: коробка із торгівельною маркою, назвою продукту і технічними характеристиками
	Марка: метроконтроль
III. Товар із підкріпленням	До продажу Максимальна комплектація, необхідна для замовника
	Після продажу після продажна підтримка, сервіс, гарантія, сервісне обслуговування
Захист товару проводиться шляхом патентування приладу, проведення заходів захисту програмного та апаратного забезпечення, .	

Висновки: Основними засобами захисту продукції від копіювання є патентування програмних та апаратних рішень, що були використані та впровадженні у приладі. Окрім того, захист програмного коду повинен запобігти копіювання програми. Закладені характеристики на другому та третьому рівнях товару робить його унікальним серед конкурентів. В таблиці 4.19 було створено трьох-рівневу модель нашого товару, що включає задум товару та його вигоди, основні характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату. Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.20.

## Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	2900-3200 у.о.	2500-2800 у.о.	12000-20000 у.о.	2500-2900 у.о.

Висновки: В таблиці проаналізовано ринкові ціни на товари-аналоги та товари-замінники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими

даними було вибрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна буде відлякувати споживачів.

Таблиця 4.21.

## Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Продаж	Повний супровід товару до замовника, його встановлення та налаштування	Канал нульового рівня	Безпосередній (прямий)
2	Оренда	Надання консультацій та оренди обладнання	Канал нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: Основними каналами збуту є оренда та продаж. Через відносно не великі об'єми виробництва нема сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збут та прямої системи збуту.

Таблиця 4.22.

## Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Зовнішні обставини спонукають споживача до пошуку рішення	Реклама SMM Сайт виробника	Високо-швидкісна Легкість Надійність	Донесення можливостей отримання прибутку за допомогою цього засобу	Показ можливостей даної системи та можливість застосування

2	Зацікавленість в продукції	Тематичні виставки Реклама інформаційних ресурсах	Високошвидкісна Легкість Надійність	Донесення можливостей отримання прибутку за допомогою цього засобу	Показ можливостей інтерактивних стендів та демонстрацій можливих сфер застосування
---	----------------------------	--	---	--	--

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу приладу в інформаційних ресурсах, що пов'язані зі сферами використання пристрою, на тематичних виставках, на сайті виробника, інформаційних буклетах, наукових та інноваційних конференціях. Ці оголошення спрямовані на показ унікальності продукції серед конкурентів, донесення можливостей даної системи та вигоди від використання. На тематичних виставках можливий демонстративний показ можливостей на інтерактивних стендах.

#### 4.6. Висновки до розділу

Даний розділ магістерської дисертації присвячений розробленню першого етапу створення стартап-проекту. Цей розділ дисертації спрямований на освоєння практичної сторони застосування проекту, та як наслідок пошуку шляхів виходу продукту на комерційну основу, який залежить від наявності попиту на даний вид товару. Більшість ідей в тій чи іншій мірі впливають на економічну складову підприємства. Тому розроблена ідея може бути використана як бізнес модель та може бути продана державним установам, приватним підприємствам або зацікавленим особам для підтримки та втілення її в реальність. Першим кроком для виконання даної роботи було описання самої ідеї проекту, а саме об'єднання як вертикального, так і горизонтального переміщення платформи пристрою в одному варіанті конструкції апаратури, оскільки каліброване пристрій (віброплатформа) застосовується в основному для калібрування горизонтальних складових сейсмометрів.

Наступним кроком було надано перелік напрямків застосування нашого проекту (приладобудування, машинобудування, авіа- та ракетобудування, а також електроніка), розглянуто очевидні вигоди впровадження, та потенційної вигоди для користувача. Для цього в таблиці 4.1 приведено можливі зацікавлені сторони, котрі будуть потенційними споживачами продукту та які саме ризики можуть бути під час реалізації. Аналіз слабких та сильних сторін серед конкурентів, дав можливість визначити конкурентоспроможності запропонованого рішення та аспекти, на яких слід зробити ставку. Було проведено технологічний аудит та аналіз ринкових можливостей, порівняно основні конкуренти в галузі. Аналіз попередньої характеристики потенційного ринку стартап-проекту показав, що ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований товар також показано, що дана робота є рентабельною. Дивлячись на високу кількість головних гравців можна судити про високий поріг

входу на ринок, але при правильному векторі розвитку проекту. Під час огляду потенційних груп споживачів обрано державні та приватні підприємства. Для впровадження продукту на ринок було обрано стратегію індивідуалізм, тому що на ринку вже існували відомі гравці з великим авторитетом та тісними зв'язками з ключовими покупцями. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації, щоб отримати певний авторитет і ім'я та зайняти певну стабільну нішу на ринку. Оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, за базову стратегію конкурентної поведінки можливо обрати стратегію виклику лідеру. Це є можливим на фоні використання інноваційних методів підвищення точності алгоритмічного забезпечення. На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект. Проаналізувавши всі аспекти ринку, можна зробити висновок, що подальша імплементація проекту є доцільна за рахунок сильних сторін продукту, наявного попиту на ринку та проведення сильної рекламної компанії, щоб донести до споживачів необхідність використання системи саме з підвищеною точністю і завадостійкістю та чому саме обрати нас.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи обрана і досліджена кінематична і функціональна схема стенду для проведення інженерних досліджень сейсмодатчиків.

Особливістю розробленої конструкції є:

- універсальність (можливість дослідження сейсмодатчиків з горизонтальною та вертикальною осями чутливості);
- автономність живлення, що дає можливість її використання в польових умовах;
- портативність (загальна маса стенду – 20 кг).

Сформований метод розрахунку системи підвісу рухомої платформи, який представляє сукупність прийомів розрахунку пружних елементів, виконана в пакеті SolidWorks.

Запропонований метод розрахунку стенду підтверджено шляхом проектування, виготовлення та експериментального дослідження.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методическое пособие по выполнению лабораторной работы «Исследование электродинамического сейсмоприёмника» // ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». 2008.
2. Устройство и принцип действия сейсмоприемников [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://studopedia.net/3\\_77717\\_tema-ustroystvo-i-printsip-deystviya-seysmopriemnikov.html](https://studopedia.net/3_77717_tema-ustroystvo-i-printsip-deystviya-seysmopriemnikov.html)
3. Тензодатчик сопротивления [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.zdaniya.ru/TermsT1/p2\\_articleid/4299](https://www.zdaniya.ru/TermsT1/p2_articleid/4299)
4. Сейсмоприёмник [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Сейсмоприёмник>
5. Пьезоэлектрические манометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://salinc.ru:65082/si/Man1.html>
6. Система поверки сейсмодатчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tdgears.ru/device/id40018.htm>
7. Разработка методики поверки сейсмодатчика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001213>
8. Ивлев.Л.Е., Коновалова Т.Н. «Особенности проверки сейсмоприемников» // журнал «Датчики и системы». – 2012. – №2.
9. ГОСТ Р 8.669-2009 ГСИ. «Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки»
10. Марк Серридж, Торбен Р. Лихт «Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям» // Дания: Глострун, 1987. — 187 с.

11. Грязин Д.Г., Скалон А.И., Чекмарев А.Б. Стенд контроля динамических характеристик микромеханических датчиков и модулей / Датчики и системы, 2011, №9, ISSN 1992-7185, ООО «СенСиДат-Контрол», сс. 30-34
12. Устройство и принцип работы сейсмоприёмников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gmr.nmu.org.ua/ua/manuals/SP1\\_L1.pdf](http://gmr.nmu.org.ua/ua/manuals/SP1_L1.pdf)
13. Способ калибровки сейсмографов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2324208>
14. Техническое описание и инструкция по эксплуатации изделия (сейсмографа) К-215-С. // ИЛЕВ 416 542.001 ТО, М., 1979, с.38-40.
15. Техническое описание и инструкция по эксплуатации изделия (сейсмографа) К-212-С1. // ДБИ 2.787.006 ТО, М., 1981, с.38-39, 40-41.
16. Петр А.Д., Вячеслав И.Ю. «Калибровка сейсмических датчиков-велосиметров ступенью смещения» // УДК 550.34.035 550.34.038.8
17. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования // Наука, М. – 1972. – С. 767.
18. Ивлев Л.Е., Коновалова Т.Н. Особенности поверки сейсмоприемников // Датчики и системы. – 2012. – №2. – С. 44–50.
19. Юшин В.И., Алгоритмические аспекты калибровки сейсмоприемников скачком смещения // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2003. – №3. – С. 44–49.
20. Щербина С.В. «Устройство для калибровки и метрологической поверки цифровых сейсмических регистраторов» // Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина. – 2014. – С. 161-171.
21. Mitronovas W., Wielandt E., 1975. High-precision phase calibration of long-period electromagnetic seismographs. Bull. Seismol. Soc. Am., 65(2), 441—424.



22. Bormann, P., and J. Saul (2009a). Earthquake magnitude. In Encyclopedia of Complexity and Systems Science, ed. R. Meyers, Springer, Heidelberg-New York: vol. 3, 2473-2496.
23. Bormann, P., and J. Saul (2009b). A fast, non-saturating magnitude estimator for great earthquakes, *Seism. Res. Lett.* 80(5), 808-816; doi: 10.1785/gssrl.80.5.808.
24. Карпинский В.В., ГС РАН, СПбГУ «Частотные характеристики и калибровка сейсмометров» // Владикавказ. – 2010.
25. Мироненко П.С. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерційних модулів / П.С.Мироненко, О.М.Павловський // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2018. – вип.56(2) – С. 5 – 9.
26. Мироненко П. С. Комплекс спеціалізованого стендового обладнання для контролю характеристик низькочастотних акселерометрів / П. С. Мироненко, О. М. Павловський, В. В. Аврутов // Вісник Київського політехнічного інституту. Серія : Приладобудування. - 2019. - Вип. 57(1). - С. 14-19.
27. ГОСТ Р ИСО 16063-1-2009 «Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 1. Основные положения»
28. v. Martens, H.-J., ДСТУ ISO 16063-1-2009 Interferometric measurement of translational and rotational motion quantities. Recent advances in experimental mechanics . S. Gomez et al. (eds), Balkema, Rotterdam, 1994
29. v. Martens, H.-J., Schlaak, H.-J., ДСТУ ISO 16063-1-2009, A. Interferometrische Kalibrierung von Translations- und Rotationsaufnehmern mit Sinus- und Stossanregung . Fortschritte der Akustik - DAGA 94 , Teil B, pp.681-684
30. В.В. Седышев, П.Е. Белочкин, Д.Н. Шаршин, К.Р. Карпусевич «Автоматизация двухосевого поворотного стола кин-52» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 16, No 1. С. 81–91

31. Антонюк В.С. Методологія наукових досліджень: [Текст] : навч.посіб./ В.С. Антонюк, Л.Г. Полонський, В.І. Аверченков, Ю.А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.
32. Палій. О.М. Пристрій контролю характеристик сейсмічних реєстраторів/ О.М.Палій, П.С.Мироненко// XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», 15-16 травня 2019 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна– С. 35– 37.
33. Тріщ Р.М. Аналіз вимог до калібрування засобів вимірювальної техніки на національному і міжнародному рівнях / Р.М.Тріщ, М.В. Москаленко, О.Є. Малецька // Метрологія та прилади.- 2011.- № 5. - С. 56-60.
34. Палій О.М., Сапегін О.М. «Навігаційний акселерометр маятникового типу» / Стандартизація, метрологія і сертифікація: Вісник інженерної академії України, №2, 2018, с. 110-115.
35. Распопов В.Я. Микромеханические приборы/М.: Машиностроение. – 2007. – 399 с.

## Додаток 1

Програмний код, що використовувався для знаття інформації при дослідженні вібростенду за допомогою контролеру UNO R3 CH340G:

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#define T_OUT 20
MPU6050 accel;
unsigned long int t_next;
float resist = 0;
float distance = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  accel.initialize();
  Serial.println(accel.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" :
"MPU6050 connection failed");
}

void loop() {
  long int t = millis();
  if ( t_next < t ) {
    int16_t ax_raw, ay_raw, az_raw, gx_raw, gy_raw, gz_raw;
    t_next = t + T_OUT;
    accel.getMotion6(&ax_raw, &ay_raw, &az_raw, &gx_raw, &gy_raw, &gz_raw);
    resist = analogRead(A0); // Опір
    //distance = map(resist, 0, 1023, 0, 100);
    TimePrint();
    Serial.print("  ");
    Serial.print(ax_raw); // вивід в порт проекції прискорення на ось X
    Serial.print("  ");
    Serial.print(ay_raw); // вивід в порт проекції прискорення на ось Y
    Serial.print("  ");
    Serial.print(az_raw); // вивід в порт проекції прискорення на ось Z
    Serial.print("  ");
    Serial.println(resist);  }
}

void TimePrint() {
  int time = millis();
  Serial.print (time / 1000);
  Serial.print (".");
  if (time % 1000 < 10) {
    Serial.print ("0");
  }
  if (time % 1000 < 100) {
    Serial.print ("0");
  }
  Serial.print (time % 1000);
}
```

## Додаток 2

Програма, яка використовувалася в програмному забезпеченні MatLAB для обчислення, фільтрація та відтворення сигналів на графіках при дослідженні вібростенду:

```
clc
clear all
close all

U_v1 = load('v1.txt');
U_g1 = load('g1.txt');
U_v2 = load('v2.txt');
U_g2 = load('g2.txt');
U_v3 = load('v3.txt');
U_g3 = load('g3.txt');
U_v4 = load('v4.txt');
U_g4 = load('g4.txt');
U_v5 = load('v5.txt');
U_g5 = load('g5.txt');

g = 9.8106; % Прискорення вільного падіння, м/с^2

U0 = [612.429962345613 -72.4706012503189 -572.236142466026]; % Калібровка
акселерометра

K = [1678.00273094745    -20.2158731923234    -53.0158228280848;
     16.5750973931703    1676.55477056015     34.3403665042392;
     63.1474693807510   -33.2435051709273    1724.41438989462];

H = 300;

%% Вертикальне положення, швидкість 1

T_v1 = U_v1(1:H,1);
Uax_v1 = U_v1(1:H,2);
Uay_v1 = U_v1(1:H,3);
Uaz_v1 = U_v1(1:H,4);
Ur_v1 = U_v1(1:H,5);
A_v1 = [Uax_v1 Uay_v1 Uaz_v1];
A_v11=(A_v1-U0)/K';
x_v1 = A_v11(:,1) - g;
y_v1 = A_v11(:,2);
z_v1 = A_v11(:,3);
r_v1 = (Ur_v1 - mean(Ur_v1))* (100/1024);

figure(1)
plot(T_v1, x_v1, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Вертикальне положення, швидкість 1');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
```

```
figure(3)
plot(T_v1, r_v1, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);
```

```
%% Вертикальне положення, швидкість 2
```

```
T_v2 = U_v2(1:H,1);
Uax_v2 = U_v2(1:H,2);
Uay_v2 = U_v2(1:H,3);
Uaz_v2 = U_v2(1:H,4);
Ur_v2 = U_v2(1:H,5);
A_v2 = [Uax_v2 Uay_v2 Uaz_v2];
A_v22=(A_v2-U0)/K';
x_v2 = A_v22(:,1) - g;
y_v2 = A_v22(:,2);
z_v2 = A_v22(:,3);
r_v2 = (Ur_v2 - mean(Ur_v2))* (100/1024);
```

```
figure(5)
plot(T_v2, x_v2, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Вертикальне положення, швидкість 2');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
```

```
figure(7)
plot(T_v2, r_v2, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);
```

```
%% Вертикальне положення, швидкість 3
```

```
T_v3 = U_v3(1:H,1);
Uax_v3 = U_v3(1:H,2);
Uay_v3 = U_v3(1:H,3);
Uaz_v3 = U_v3(1:H,4);
Ur_v3 = U_v3(1:H,5);
A_v3 = [Uax_v3 Uay_v3 Uaz_v3];
A_v33=(A_v3-U0)/K';
x_v3 = A_v33(:,1) - g;
y_v3 = A_v33(:,2);
z_v3 = A_v33(:,3);
r_v3 = (Ur_v3 - mean(Ur_v3))* (100/1024);
```

```
figure(9)
plot(T_v3, x_v3, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Вертикальне положення, швидкість 3');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
```

```
figure(11)
plot(T_v3, r_v3, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);
```

```
%% Вертикальне положення, швидкість 4
```

```
T_v4 = U_v4(1:H,1);
Uax_v4 = U_v4(1:H,2);
Uay_v4 = U_v4(1:H,3);
Uaz_v4 = U_v4(1:H,4);
Ur_v4 = U_v4(1:H,5);
A_v4 = [Uax_v4 Uay_v4 Uaz_v4];
A_v44=(A_v4-U0)/K';
x_v4 = A_v44(:,1) - g;
y_v4 = A_v44(:,2);
z_v4 = A_v44(:,3);
r_v4 = (Ur_v4 - mean(Ur_v4)) * (100/1024);
```

```
figure(13)
plot(T_v4, x_v4, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Вертикальне положення, швидкість 4');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
```

```
figure(15)
plot(T_v4, r_v4, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);
```

```
%% Вертикальне положення, швидкість 5
```

```
T_v5 = U_v5(1:H,1);
Uax_v5 = U_v5(1:H,2);
Uay_v5 = U_v5(1:H,3);
Uaz_v5 = U_v5(1:H,4);
Ur_v5 = U_v5(1:H,5);
A_v5 = [Uax_v5 Uay_v5 Uaz_v5];
A_v55=(A_v5-U0)/K';
x_v5 = A_v55(:,1) - g;
y_v5 = A_v55(:,2);
z_v5 = A_v55(:,3);
r_v5 = (Ur_v5 - mean(Ur_v5)) * (100/1024);
```

```
figure(17)
plot(T_v5, x_v5, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Вертикальне положення, швидкість 5');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
```

```
figure(19)
plot(T_v5, r_v5, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
```

```

ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%% Горизонтальне положення, швидкість 1

T_g1 = U_g1(1:H,1);
Uax_g1 = U_g1(1:H,2);
Uay_g1 = U_g1(1:H,3);
Uaz_g1 = U_g1(1:H,4);
Ur_g1 = U_g1(1:H,5);
A_g1 = [Uax_g1 Uay_g1 Uaz_g1];
A_g11=(A_g1-U0)/K';
x_g1 = A_g11(:,1);
y_g1 = A_g11(:,2);
z_g1 = A_g11(:,3);
r_g1 = (Ur_g1 - mean(Ur_g1))* (100/1024);

figure(21)
plot(T_g1, x_g1, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Горизонтальне положення, швидкість 1');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);
figure(23)
plot(T_g1, r_g1, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%% Горизонтальне положення, швидкість 2

T_g2 = U_g2(1:H,1);
Uax_g2 = U_g2(1:H,2);
Uay_g2 = U_g2(1:H,3);
Uaz_g2 = U_g2(1:H,4);
Ur_g2 = U_g2(1:H,5);
A_g2 = [Uax_g2 Uay_g2 Uaz_g2];
A_g22=(A_g2-U0)/K';
x_g2 = A_g22(:,1);
y_g2 = A_g22(:,2);
z_g2 = A_g22(:,3);
r_g2 = (Ur_g2 - mean(Ur_g2))* (100/1024);

figure(25)
plot(T_g2, x_g2, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Горизонтальне положення, швидкість 2');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);

figure(27)
plot(T_g2, r_g2, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%% Горизонтальне положення, швидкість 3

```

```

T_g3 = U_g3(1:H,1);
Uax_g3 = U_g3(1:H,2);
Uay_g3 = U_g3(1:H,3);
Uaz_g3 = U_g3(1:H,4);
Ur_g3 = U_g3(1:H,5);
A_g3 = [Uax_g3 Uay_g3 Uaz_g3];
A_g33=(A_g3-U0)/K';
x_g3 = A_g33(:,1);
y_g3 = A_g33(:,2);
z_g3 = A_g33(:,3);
r_g3 = (Ur_g3 - mean(Ur_g3))* (100/1024);

figure(29)
plot(T_g3, x_g3, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Горизонтальне положення, швидкість 3');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);

figure(31)
plot(T_g3, r_g3, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%% Горизонтальне положення, швидкість 4

T_g4 = U_g4(1:H,1);
Uax_g4 = U_g4(1:H,2);
Uay_g4 = U_g4(1:H,3);
Uaz_g4 = U_g4(1:H,4);
Ur_g4 = U_g4(1:H,5);
A_g4 = [Uax_g4 Uay_g4 Uaz_g4];
A_g44=(A_g4-U0)/K';
x_g4 = A_g44(:,1);
y_g4 = A_g44(:,2);
z_g4 = A_g44(:,3);
r_g4 = (Ur_g4 - mean(Ur_g4))* (100/1024);

figure(33)
plot(T_g4, x_g4, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Горизонтальне положення, швидкість 4');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);

figure(35)
plot(T_g4, r_g4, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%% Горизонтальне положення, швидкість 5

T_g5 = U_g5(1:H,1);
Uax_g5 = U_g5(1:H,2);

```



```

Uay_g5 = U_g5(1:H,3);
Uaz_g5 = U_g5(1:H,4);
Ur_g5 = U_g5(1:H,5);
A_g5 = [Uax_g5 Uay_g5 Uaz_g5];
A_g55=(A_g5-U0)/K';
x_g5 = A_g55(:,1);
y_g5 = A_g55(:,2);
z_g5 = A_g55(:,3);
r_g5 = (Ur_g5 - mean(Ur_g5))* (100/1024);

figure(37)
plot(T_g5, x_g5, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
title('Горизонтальне положення, швидкість 5');
xlabel('час, с');
ylabel('прискорення, м/с^2');
% xlim([0 5]);

figure(39)
plot(T_g5, r_g5, 'k', 'LineWidth', 1),grid on,grid minor;
xlabel('час, с');
ylabel('переміщення, мм');
% xlim([0 5]);

%%

model = vertical_1(T_v1, x_v1);
model = vertical_11(T_v1, r_v1);
model = vertical_2(T_v2, x_v2);
model = vertical_22(T_v2, r_v2);
model = vertical_3(T_v3, x_v3);
model = vertical_33(T_v3, r_v3);
model = vertical_4(T_v4, x_v4);
model = vertical_44(T_v4, r_v4);
model = vertical_5(T_v5, x_v5);
model = vertical_55(T_v5, r_v5);
model = gorizontal_1(T_g1, x_g1);
model = gorizontal_11(T_g1, r_g1);
model = gorizontal_2(T_g2, x_g2);
model = gorizontal_22(T_g2, r_g2);
model = gorizontal_3(T_g3, x_g3);
model = gorizontal_33(T_g3, r_g3);
model = gorizontal_4(T_g4, x_g4);
model = gorizontal_44(T_g4, r_g4);
model = gorizontal_5(T_g5, x_g5);
model = gorizontal_55(T_g5, r_g5);

```

### Додаток 3

Ф. № 3.3

## СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Палій Олександр Максимович (прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
1	Пристрій контролю характеристик сейсмічних регістраторів	Погляд у майбутнє приладобудування: XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 15-16 травня 2019 р.: збірник праць конференції. – Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2019	3	Мироненко П.С.
2	Інформаційні технології в проектуванні сучасних приладів систем орієнтації і навігації	Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 10-11 грудня 2019 р.: збірник праць конференції. – Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2019	3	Чепік Я.В., Мироненко П.С.
3	Навігаційний акселерометр маятникового типу	Стандартизація, метрологія і сертифікація: Вісник інженерної академії України, №2, 2018	5	Сапегін О.М.

Автор

(підпис)

О.М. Палій

Зав. каф. ПСОН

(підпис)

Н.І. Бурау