

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

**Приладобудівний**  
(повна назва інституту/факультету)

**Приладів і систем орієнтації та навігації**  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 658.512.2-52

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності (спеціалізації): 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і назва спеціальності)

на тему: «Підвищення точності контролю стану приладів орієнтації і навігації»

Виконала: студентка VI курсу, групи ПГ-71мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Чаплинська Дар'я Володимирівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник: доц., к.т.н. Мироненко П. С. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з: Розробка стартап-проекту \_\_\_\_\_  
(назва розділу)

\_\_\_\_\_ доц., к.е.н. Бояринова К. О. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент: \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

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

Студентка \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

**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

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

\_\_\_\_\_ Чаплинській Дар'ї Володимирівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення точності контролю стану приладів орієнтації і навігації»

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

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

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

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

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

## 5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1) Огляд стану і перспектив підвищення функціонування автономних засобів вібраційних випробувань з метою підвищення точності і скорочення часових затрат.

2) Розробка методів і пристроїв для реєстрації, аналізу та управління динамічними випробуваннями.

3) Розробка інформаційно-вимірювального модуля вібраційних характеристик стенду.

4) Розробка стартап-проекту

## 6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Презентація (схеми, графіки та таблиці)

## 7. Орієнтований перелік публікації

---

---

---

## 8. Консультанти розділів дисертації

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

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд стану і перспектив підвищення функціонування автономних засобів вібраційних випробувань з метою підвищення точності і скорочення часових затрат.		
2	Розробка методів і пристроїв для реєстрації, аналізу та управління динамічними випробуваннями.		
3	Розробка інформаційно-вимірювального модуля вібраційних характеристик стенду.		
4	Розробка стартап-проекту		

Студент \_\_\_\_\_ . Чаплинська Д. В. .  
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ . Мироненко П. С. .  
(підпис) (ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

*Актуальність даної роботи* пов'язана з необхідністю подальшого розвитку апаратури і алгоритмів функціонування для забезпечення динамічних випробувань, вібраційної діагностики та віброзахисту приладів СОН, а, отже, з необхідністю проведення високоінформативних процедур управління, контролю і діагностики, що вимагають точних вимірювань сигналу, створення контрольно-вимірювального та випробувального обладнання, оснащення сучасними керуючими і вимірювальними системами існуючих і нових діагностичних, випробувальних комплексів.

*Мета дисертаційної роботи полягає в* удосконаленні пристрою для перевірки з системою вимірювання працездатності датчиків (приладів) первинної інформації, які можуть бути використані в системі визначення сейсмічної стійкості споруд; проведення попереднього калібрування датчиків та створення системи реєстрації параметрів вимірювачів вібрації на комп'ютері та цифрових носіях інформації.

### *Задачі роботи:*

- 1) огляд схемно-конструктивних рішень та методів при автоматизації вібраційних випробувань, адаптованих до автономних умов роботи;
- 2) автоматизація вібраційних випробувань з метою скорочення часових витрат;
- 3) розробка методів підвищення точності, достовірності вимірювань і наочності подання інформації за рахунок мінімізації впливу людського фактора на процес проведення випробувань;
- 4) розробка інформаційно-вимірювального модуля реєстрації сигналів з вібродатчиків для проведення аналізу отриманих результатів з метою отримання висновку про їх працездатність.

*Об'єктом дослідження:* пристрій для проведення попередніх вібраційних досліджень з інформаційно-вимірювальним модулем та апаратурою для цифрової реєстрації сигналів.

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

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

**Наукова новизна** виконаної дисертації полягає в розробці автономного універсального стенду для динамічних випробувань і калібрування датчиків, який забезпечує дослідження вимірювачів вібрації горизонтальною або вертикальною віссю чутливості в одному варіанті конструкції. За рахунок великого розміру платформи на ній можливе розміщення відразу декількох сейсмометрів для тестування їх технічного стану.

Також перевагами є:

- Мобільність – можливість використання в польових та експлуатаційних умовах);
- Автономне живлення;
- Достатньо великий діапазон вібропереміщення – до 15 мм з частотою до 15 Гц.

Пристрій має можливість подальшої модернізації з метою формування еліптичної (кругової) вібрації. Такий стенд доцільно використовувати не тільки для промислових випробувань, але і для наукових та учбових досліджень.

### **Апробація роботи**

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

- XVII Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”, 15-16 травня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ.

— XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 4-5 грудня 2018 р. Київ.

### **Публікації**

По темі дисертації опубліковано 2 друкованих роботи. Список наукових праць наведено в Додатку.

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

### **Структура і об'єм дисертації.**

Пояснювальна записка складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури 35 найменування і 2 додатків; викладена на 115 сторінках тексту, містить рисунки та таблиці.

## ABSTRACT

**The urgency of this work** is connected with the necessity of further development of equipment and algorithms of functioning to provide dynamic testing, vibration diagnostics and vibration protection of SOH devices, and, consequently, the need for highly informative management, control and diagnostic procedures requiring accurate signal measurements, measuring and testing equipment, equipping modern controllers and measuring systems of existing and new diagnostic, testing complexes.

**The purpose of the dissertation work** is to improve the device for checking with the system of measuring the efficiency of sensors (devices) of the primary information that can be used in the system of determination of seismic stability of structures; carrying out preliminary calibration of sensors and creating a system for registering parameters of vibration meters on a computer and digital information carriers.

### **Tasks of work:**

- 1) Review of circuit-constructive solutions and methods for automation of vibration testing, adapted to autonomous working conditions;
- 2) automation of vibration tests in order to reduce time expenditures;
- 3) development of methods for increasing the accuracy, reliability of measurements and visual presentation of information by minimizing the influence of the human factor on the process of testing;
- 4) development of the information-measuring module for registration of signals from vibration sensors for the analysis of the obtained results in order to obtain a conclusion on their capacity for work.

**The object of research:** a device for conducting preliminary vibration studies with an information measuring unit and equipment for digital signal recording.

**Subject of research:** models and algorithms for measurement and registration of vibration parameters, model of functioning and algorithms for providing a dynamic range of tests.

**The practical value** of the work is that on the basis of the analysis of structural and structural methods for ensuring the reliability and accuracy of dynamic tests, a stand and an autonomous signal recorder are provided that provide increased reliability and informativity in a wide range of mechanical disturbances, with the ability to protect and restore the measurement information under action external obstacles both stationary and non-stationary nature.

**The scientific novelty** of the dissertation is to develop an autonomous universal stand for dynamic testing and calibration of sensors, which provides the study of vibration meters with a horizontal or vertical axis of sensitivity in one version of the design. Due to the large size of the platform, it is possible to post several seismometers at once to test their technical condition.

Also the benefits are:

- Mobility - the ability to use in the field and operating conditions);
- Stand-alone power supply;
- Sufficiently large range of vibrational displacement - up to 15 mm with frequency up to 15 Hz.

The device has the possibility of further upgrading in order to create elliptical (circular) vibration. Such a stand is expedient to use not only for industrial tests, but also for scientific and educational research.

### **Test work**

The main provisions of this work and the intermediate results on the topic of the thesis were reported and discussed at the following conferences:

- XVII International Scientific and Technical Conference "Instrumentation: Status and Prospects", May 15-16, 2018, KPI them. Igor Sikorsky, Kiev.
- XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Efficiency of Engineering Solutions in Instrumentation", December 4-5, 2018, Kyiv.

### **Publications**

On the topic of the dissertation published 2 printed works. The list of scientific works is given in the Appendix.

**Key words:** low frequency vibrational area, calibration, vibration velocity, vibration acceleration, vibrational displacement

**Structure and volume of the dissertation.**

An explanatory note consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of used literature, 35 titles and 2 appendices; set out in 115 pages of text, contains drawings and tables.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ЗАСОБИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ВІБРОВИМІРЮВАНЬ	15
1.1 Характеристики низькочастотних датчиків первинної інформації	15
1.1.1 Акселерометр п'єзоелектричний трьохкомпонентний	16
1.1.2 Сейсмоприймач великих переміщень	18
1.1.3 Методика та експериментальна установка для дослідження параметрів п'єзоакселерометрів АПТ-1М	21
1.2 Особливості перевірки сейсмоприймачів	25
1.2.1 Вибір метода вимірювань	26
1.2.2 Вибір датчика переміщення	27
1.2.3 Вплив зовнішніх факторів	29
1.2.4 Вибір методу аналізу сигналів	31
1.2.5 Порядок перевірки	31
1.3 Огляд методів і засобів забезпечення динамічних випробувань і вібродіагностики приладів СОН	33
3.1 Основні принципи побудови автономних реєстраторів сигналів з п'єзоелектричними датчиками прискорення	33
1.3.2 Методи гармонічних вібраційних випробувань виробів	40
1.3.3 Приводи мікропереміщень і вібратори з пружньо-деформуваним актюатором на основі магнітопружного ефекту Відемана.	49
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	53
2.1 Нормування основних метрологічних характеристик лінійних низькочастотних акселерометрів	53
2.1.1 Статична характеристика акселерометра	54

2.1.2 Похибка в нормальних умовах застосування приладу (основна похибка)	55
2.1.3 Динамічні похибки	57
2.2 Точність оцінки спектрів прискорення, швидкості і переміщень в системах вібродіагностики машин	60
2.3 Динаміка системи управління процесу вимірювання і алгоритми управління гармонійними випробуваннями виробів	62
2.3.1 Засоби забезпечення гармонійних вібраційних випробувань з розгорткою по частоті при контролі віброміцності виробів	62
2.3.2 Моделювання та експериментальні дослідження поведінки модельного об'єкта випробувань при вібраційному навантаженні	66
2.4 Приводи мікропереміщення і вібратори з пружньо-деформованими актюаторами на магніто-пружньому ефекті Відемана	67
2.4.1 Приводи і вібратори з пружно-деформованим актюатором пружинного типу на магнітопружньому ефекті Відемана	67
2.4.2 Приводи мікропереміщень і вібратори з пружньо-деформованими актюаторами у вигляді плоскої спіралі на основі магнітопружнього ефекту Відемана	73
<b>РОЗДІЛ 3 СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ СЕЙСМОДАТЧИКІВ</b>	<b>76</b>
3.1 Апаратна частина стенда перевірки сейсмодатчиків	76
<i>Вимірювальний модуль</i>	80
3.2 Програмна частина перевірки сейсмодатчиків <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.3 Методика перевірки працездатності сейсмоприймачів	84
3.4 <i>Перевірка сейсмоприймачів малих переміщень</i> <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.5 Результати досліджень	86
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВІБРАЦІЙНИЙ СТЕНД ТА МОДУЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ»</b>	<b>95</b>
4.1 Опис ідеї проекту	95

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	98
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	99
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	105
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	107
4.6. Висновки до розділу	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- СОН – системи орієнтації і навігації  
ФЧХ – фазочастотна характеристика  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика  
АХ – амплітудна характеристика  
КП – коефіцієнт перетворення  
ПА – п'єзоелектричний акселерометр  
ЧЕ – чутливий елемент  
ІДВ – інтелектуальний датчик вібрації  
СКЗ – середньоквадратичне значення  
ВС – вібростенд  
БФТВ – блок формування тестового впливу  
МПК – мікропроцесорний контролер  
ЗП – зарядовий підсилювач  
ДН – джерело напруги  
ПЗ – програмне забезпечення  
ПР – пристрій реєстрації  
ПД – підсилювач датчика  
ПГ – програмуємий генератор  
ПП – підсилювач потужності  
МСТ – мікросистемо техніка  
МЕМС – мікроелектромеханічні системи  
ПФ – перетворення Фур'є  
ШПФ – швидке перетворення Фур'є  
ДПФ – дискретне перетворення Фур'є  
АРР- автоматичний регулятор рівня

## ВСТУП

Для безпечної експлуатації будівель та споруд різного призначення необхідно забезпечити їх стійкість при збудженнях природного чи техногенного походження. Одним з етапів визначення сейсмічної стійкості споруд є випробування з метою отримання інформації про коливання елементів конструкції споруди та прилеглих ділянок ґрунту під впливом згенерованого вібраційного збурення, яке імітує землетрус.

Інформація, отримана при таких дослідженнях, використовується для:

- вдосконалення методів розрахунку споруди на сейсмічну стійкість;
- розробки методик випробувань елементів конструкцій за умови сейсмічних впливів;
- інженерної оцінки сейсмічної стійкості споруди у процесі та після її зведення.

Для проведення подібних випробувань використовуються вібраційні машини (вібраційні стенди), що генерують типові вібраційні збурення у заданих діапазонах переміщень та частот, та сейсмометрична апаратура з каналами зв'язку (сейсмометричні станції) для реєстрації переміщень елементів споруди та прилеглих ділянок ґрунту.

У якості датчиків первинної інформації використовуються сейсмоприймачі – прилади для перетворення параметрів механічних коливань (вібраційної швидкості чи вібраційного прискорення) в електричний сигнал.

Такі датчики первинної інформації призначені для вимірювання низькочастотних лінійних прискорень в інженерно-сейсмічних дослідженнях в польових і експедиційних умовах, а також в стаціонарних інженерно-сейсмометричних і сейсмічних станціях. Ці прилади використовуються також при дослідженнях сейсмічного ефекту вибуху, для виявлення джерел коливань при роботі точних приладів, в тому числі приладів систем орієнтації та

навігації (СОН), вивченні вірогідності землетрусів в районах будівель, а також в системах моніторингу технічного стану конструкцій будівель, споруд і мостів [1].

*Актуальність теми* пов'язана з необхідністю подальшого розвитку апаратури і алгоритмів функціонування для забезпечення динамічних випробувань, вібраційної діагностики та віброзахисту приладів СОН, а, отже, з необхідністю проведення високоінформативних процедур управління, контролю і діагностики, що вимагають точних вимірювань сигналу, створення контрольно-вимірювального та випробувального обладнання, оснащення сучасними керуючими і вимірювальними системами існуючих і нових діагностичних, випробувальних комплексів.

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

Важливе місце в комплексі заходів щодо забезпечення необхідної якості продукції, що випускається, і забезпечення безпеки при експлуатації, займають динамічні випробування і вібродіагностика.

Динамічні випробування, що проводяться в процесі розробки машин, дозволяють виявляти конструктивні недоробки на етапі їх проектування [2].

Періодична вібродіагностика, що проводиться в процесі експлуатації, дозволяє виявляти появи несправності більшості машин задовго до того моменту, коли відмова стає неминучістю [3], тобто забезпечувати експлуатацію устаткування за станом, що відповідає технічним умовам.

Існує велика кількість машин і механізмів, робочі органи яких повинні здійснювати керований точний рух в інерційному просторі (складальні автомати, приводи систем управління, приводи систем адаптивної оптики), або знаходитись в стані спокою (гравітаційні градієнтометри, сейсмометри), практично не збуджуючись на вібраційній основі. З причини підвищеної точності і великої швидкодії роботи даних пристроїв пасивний віброзахист і традиційний привід, що

містить кінематичні пари з зовнішнім тертям, часто не справляється із завданням забезпечення точності. При цьому часто не забезпечується необхідна швидкодія або створюються неприпустимі помилки і шуми [4], що вимагають створення нового типу приводів. Але у випадках, коли частотний діапазон не перевищує 50 Гц, як показали дослідження, може використовуватись і електромашинні стенди.

У роботі представлені теоретичні й експериментальні дослідження розробки стендів подібного типу.

Такі теоретичні дослідження та системи обробки вібраційних сигналів базуються на використанні методів спектрального та статистичного аналізу часових рядів з додатком до сигналів з інерційних датчиків як одновимірних випадкових процесів, що допускають дискретизовану реалізацію.

Теоретичні дослідження об'єктів управління при вібраційних випробуваннях проводилися з використанням методів теорії механічних коливань пружних просторово розподілених і зосереджених систем, теорії машин і механізмів та методів аналізу динамічних систем.

*Метою дисертаційної роботи є* удосконалення пристрою для перевірки працездатності датчиків (приладів) первинної інформації, які можуть бути використані в системі визначення сейсмічної стійкості споруд; проведення попереднього калібрування датчиків та створення системи реєстрації параметрів вимірювачів вібрації на комп'ютері та цифрових носіях інформації.

***Задача роботи:***

- 1) огляд схемно-конструктивних рішень та методів при автоматизації вібраційних випробувань, адаптованих до автономних умов роботи;
- 2) автоматизація вібраційних випробувань з метою скорочення часових витрат;
- 3) розробка методів підвищення точності, достовірності вимірювань і наочності подання інформації за рахунок мінімізації впливу людського фактора на процес проведення випробувань;

- 4) розробка інформаційно-вимірювального модуля реєстрації сигналів з вібродатчиків для проведення аналізу отриманих результатів з метою отримання висновку про їх працездатність.

**Об'єктом дослідження є** пристрій для проведення попередніх вібраційних досліджень з інформаційно-вимірювальним модулем та апаратурою для цифрової реєстрації сигналів.

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

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

**Наукова новизна** виконаної дисертації полягає в розробці автономного універсального стенду для динамічних випробувань і калібрування датчиків, який забезпечує дослідження вимірювачів вібрації горизонтальною або вертикальною віссю чутливості в одному варіанті конструкції. За рахунок великого розміру платформи на ній можливе розміщення відразу декількох сейсмометрів для тестування їх технічного стану.

Також перевагами є:

- Мобільність – можливість використання в польових та експлуатаційних умовах);
- Автономне живлення;
- Достатньо великий діапазон вібропереміщення – до 15 мм з частотою до 15 Гц.

Пристрій має можливість подальшої модернізації з метою формування еліптичної (кругової) вібрації. Такий стенд доцільно використовувати не тільки для промислових випробувань, але і для наукових та учбових досліджень.

## РОЗДІЛ 1

### ОСНОВНІ ЗАСОБИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ВІБРОВИМІРЮВАНЬ

#### 1.1 Огляд засобів низькочастотної діагностики

Як показує практика, сучасне прецизійне приладобудування потребує проведення випробувань приладів і систем в умовах максимальної реалістичності, тобто наближених до реальних умов експлуатації [1].

Випробування приладів орієнтації і навігації, що застосовуються в транспортній промисловості та аерокосмічній галузі, пов'язані з моделюванням в лабораторних умовах різних режимів руху об'єктів, на яких в подальшому планується експлуатація приладів. Подібного роду випробування є важливим етапом підготовки до експлуатації і ставлять перед собою мету – перевірку працездатності, функціональної надійності виробу в реальних умовах застосування [1].

Як правило, динаміка транспортного засобу, особливо руху літальних апаратів, має складний характер, що викликано складними траєкторіями руху і наявністю змінних навантажень. Це викликає істотні труднощі при розробці, проектуванні, виготовленні випробувальних стендів, що імітують реальні умови польоту.

В даний час наука і виробництво у всьому світі накопичило великий досвід вирішення подібних завдань. Лідери даної області – компанії Ideal Aerosmith (США), Acutronic (Швейцарія) – мають у своєму портфелі повний модельний ряд випробувального устаткування, починаючи з малогабаритних поворотних столів і закінчуючи великими багатовісьовими стендами для моделювання та імітації польоту [1].

Сучасні випробувальні стенди – це складні мехатронні системи, в яких гармонійно поєднуються закони механіки, електроніки та теорії автоматичного управління [2, 3]. Для створення і виробництва вітчизняних випробувальних стендів високої якості потрібно розробити методи, виготовити інструменти і підготувати

фахівців передового рівня науки і техніки, здатних створювати високонадійну випробувальну апаратуру.

Надані датчики первинної інформації призначені для вимірювання низькочастотних лінійних прискорень в інженерно-сейсмічних дослідженнях в польових і експедиційних умовах, а також в стаціонарних інженерно-сейсмометричних і сейсмічних станціях. Такі прилади використовуються при дослідженнях сейсмічного ефекту вибуху, для виявлення джерел коливань при роботі точних приладів, вивченні вірогідності землетрусів в районах будівель, а також в системах моніторингу технічного стану конструкцій, будівель, споруд і мостів [1].

Далі детальні розглянемо принцип роботи, основні характеристики та опис конструкції наданих для дослідження сейсмічних приймачів [4].

### **1.1.1 Акселерометр п'єзоелектричний трьохкомпонентний**

- **Технічний опис**

Акселерометр п'єзоелектричний трьохкомпонентний АПТ-1М (рис. 1.1) призначений для реєстрації прискорень руху ґрунту та інженерних споруд при сильних землетрусах, промислових вибухах та інших сейсмічних явищах з перенавантаженням до 2g в діапазоні частот від 0,2 до 500 Гц.

Акселерометр може одночасно реєструвати вертикальну та дві взаємно перпендикулярні горизонтальні складові прискорення об'єкта. Має спільну інертну масу, яка разом з трьома парами п'єзоелектричних пластин створюють три взаємно перпендикулярні вимірювальні системи п'єзоелектричного датчика.

Вбудований в акселерометр трьохканальний підсилювач має внутрішнє живлення, яке забезпечує тривалу автономну роботу приладу.



Рис. 1.1 Зовнішній вигляд п'єзоелектричного трьохкомпонентного акселерометра АПТ-1М

- **Технічні характеристики**

Кінематичні параметри реєстрації, м/с, м/с <sup>2</sup> .....	швидкість, прискорення
Період власних коливань маятника, с .....	10 <sup>-3</sup>
Приведена довжина маятника, м .....	—
Діапазон частот, Гц .....	0,2-500
Повітряне загасання .....	0,02
Коефіцієнт перетворення, Вм/с .....	0,065
Опір робочої котушки, Ом .....	2x10 <sup>3</sup>
Смуга пропускання, Гц .....	0,002- 0,8
Чутливість робочої котушки, В/g.....	2,5
Максимальне вимірювальне прискорення, g .....	2
Живлення від джерела постійного струму, В .....	12
Габаритні розміри, мм .....	135x135x145
Маса, кг .....	8

- **Опис конструкції**

Конструкція приладу складається зі сталюого корпусу, в який вмонтовані датчики, підсилювач та джерела живлення (рис. 1.2).

Інерційна маса (1) має форму куба масою 1,5 кг, на бокових поверхнях якої встановлені п'єзокерамічні пластини (2). Пластини за допомогою п'яти спеціальних клинових затискачів (3) через вільні кульки фіксують інерційну масу в корпусі (4).

Система клинових затискачів дає змогу регулювати ступінь притискання кожної пари п'єзокерамічних пластин до корпусу. При цьому власна частота кожного датчика не повинна змінюватись більш, ніж на  $\pm 15\%$  від номінального значення, яке для акселерометра складає біля 1кГц.

П'єзокерамічні пластини виготовлені з ЦТС (цирконата титану та свинцю), мають діаметр 25 мм і товщину 2 мм. Вони приклеєні до латунного кубу спеціальним клеєм, який може проводити струм.

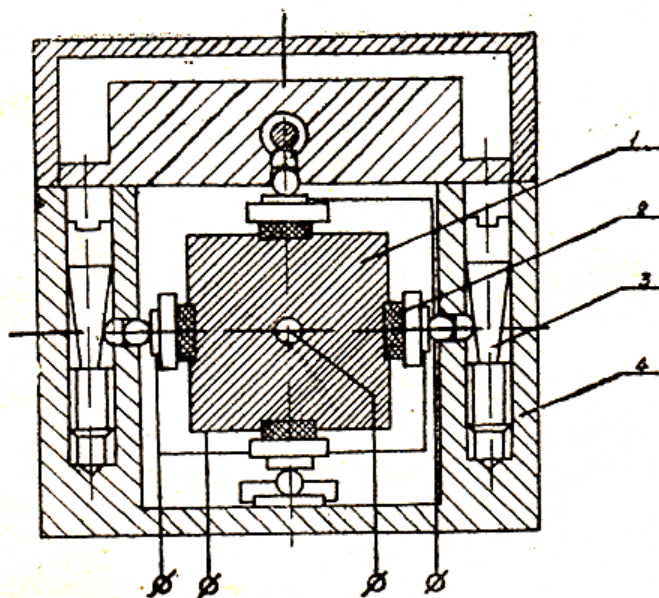


Рис. 1.2 Схема акселерометра АПТ-1М: 1 – інерційна маса; 2 – п'єзокерамічні пластини; 3 – затискачі; 4 – корпус

### 1.1.2 Сейсмоприймач великих переміщень

- **Технічний опис**

Сейсмоприймач ВБПП призначений для перетворення великих лінійних переміщень і кутових поворотів при коливаннях об'єктів в електричний сигнал при потужних промислових вибухах, при землетрусах, а також для вивчення коливань машин і механізмів з частотою 1 – 100 Гц, амплітудою до 200 мм і кутовими

поворотами до  $10^0$ . Сейсмоприймач працює в комплекті зі шлейфовим осцилографом Н – 700, який використовується як прилад для реєстрації сигналів. Загальний вигляд приладу зі знятою кришкою наведено на рис. 1.3.

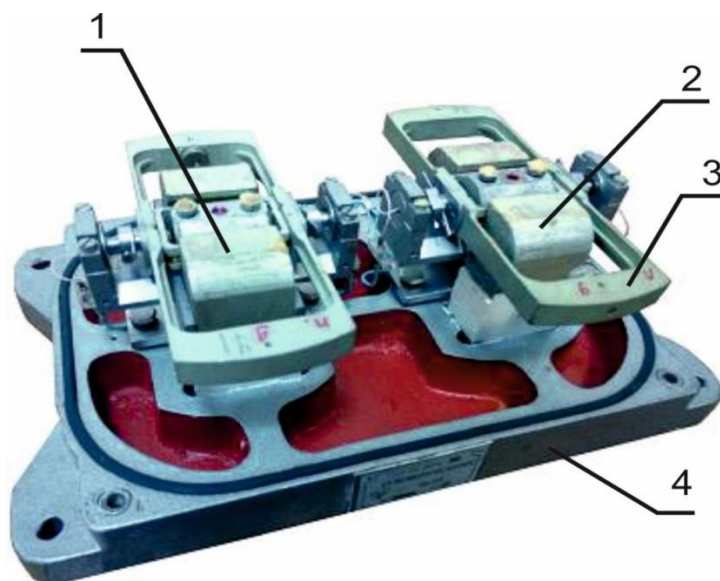


Рис. 1.3 Загальний вигляд (зі знятою кришкою) сейсмоприймача великих переміщень ВПП

- **Технічні характеристики**

Кінематичні параметри реєстрації, м, град, м/с .....	зміщення, кут. поворот, швидк.
Період власних коливань маятника, с .....	2
Приведена довжина маятника, м .....	1
Постійна загасання .....	0,7
Коефіцієнт перетворення, Вм/с .....	0,065
Опір робочої котушки, Ом .....	40–48
Смуга пропускання, Гц .....	0,01-1
Динамічний діапазон зміщення, мм .....	1-200
Чутливість робочої котушки, Вс/м .....	0,1
Габаритні розміри, мм .....	290x180x150
Маса, кг .....	10,2

- **Опис конструкції**

Сейсмоприймач ВБПП (рис. 1.3) є двохмаятниковим приладом з двома магнітоелектричними перетворювачами.

Основними складовими частинами сейсмоприймача є дві магнітні системи (1) та (2), маятники з магнітоелектричними перетворювачами (3), котушки на каркасах, які виготовлені з електротехнічної міді, і основа (4).

Магнітна система кожного маятника складається з підковоподібного постійного магніту з полюсним наконечником і осердям.

В повітряному зазорі між наконечником магніту і осердям утворюється рівномірне радіальне магнітне поле, в якому знаходиться каркас – демпфер з обмоткою котушки. Основа з магнітною системою кріпиться жорстко до об'єкту вимірювання коливань (грунту, машини, споруди). Маятник в силу інерції прагне залишитися у спокої.

Таким чином, при виникненні відносного переміщення між котушкою і магнітом в котушці збуджується ЕРС.

Основна відмінність сейсмоприймача ВБПП від аналогічних сейсмоприймачів – здатністю вимірювати характеристики вібрації в умовах кутових поворотів основи величиною до  $\pm 10^0$ .

Як відомо, маятник будь-якої конструкції відкликається як на лінійне переміщення, так і на повороти його основи навколо осі, яка паралельна осі обертання маятника. Розділити на записах ці повороти чутливого елемента без використання спеціальних заходів неможливо. Для такого розділення в сейсмоприймачі ВБПП використовується ідентичних два маятника, осі чутливі яких паралельні, але направлені в протилежні боки (центри мас цих маятників знаходяться по різні боки від осей обертання). Така система по різному реагує на лінійне переміщення і повороти основи приладу.

Підключивши вимірювальні котушки перетворювачів, з'єднаних послідовно, на складання або на віднімання виникаючих в них ЕРС, можна отримати результати вимірювання, які відповідають або тільки лінійним переміщенням, або тільки кутовим.

### 1.1.3 Методика та експериментальна установка для дослідження параметрів п'єзоакселерометрів

В [4] обґрунтовано залежність між поточним значенням коефіцієнта перетворення (КП) п'єзоелектричного акселерометра (ПА) і амплітудою згасаючих вільних коливань, що виникають в чутливому елементі (ЧЕ) ПА під впливом тестового імпульсу напруги і описаних вираженням:

$$q(t) = Qe^{-\frac{t}{\tau}} \cos(2\pi f_0 t)$$

де  $q$  – миттєве значення заряду;  $t$  – час;  $Q$  – амплітудне (початкове) значення заряду;  $\tau$  – постійна часу загасання перехідного процесу;  $f_0$  – частота вільних коливань ЧЕ.

З використанням виявленої залежності запропонований і реалізований в пристрої [5] метод підвищення точності інтелектуального датчика вібрації (ІДВ), що полягає в порушенні вільних коливань ЧЕ ПА, визначенні їх амплітуди, обчисленні поточного значення КП ПА і корекції коефіцієнта передачі вимірювального каналу з урахуванням обчисленого значення КП.

Результати експериментів підтверджують коректність запропонованого методу і його достатню точність для декількох досліджених примірників ПА. Проте при розробці ІДВ з використанням ПА інших типів доцільно переконатися в тому, що для них похибка визначення КП запропонованим методом не перевищує допустимих значень. Отже, виникає завдання розробки методики виконання таких досліджень.

Для досягнення поставленої мети потрібно мати можливість будь-яким способом змінювати КП досліджуваного ПА. Єдиним доступним способом, що дозволяє виконати цю операцію без порушення цілісності ПА, є зміна температури ПА. Оскільки завдання вимірювання КП виникло саме через його сильну залежності від температури, даний спосіб є цілком прийнятним.

Дослідити взаємозв'язок КП ПА і параметри вільних коливань, а також визначати похибки обчислення КП ПА запропоновано за такою методикою:

1. Визначити фактичне значення КП ПА при нормальних умовах  $K_0$ . Для цього потрібно впливати на ПА джерелом вібрації зі середньоквадратичним значенням віброприскорення  $\alpha_{e0}$ . Виміряти середньоквадратичне значення заряду на виході ПА  $q_0$ , пропорційне середньоквадратичному значенню віброприскорення.

Обчислити КП ПА по формулі

$$K_0 = q_0 / \alpha_{e0}$$

2. Впливати на ПА тестовим імпульсом і визначити параметри перехідного процесу при нормальних умовах  $Q_0$ ,  $f_{00}$ ,  $\tau_0$ . Відповідно з [4] визначити константу  $C_A$  по формулі

$$C_A = K_Q / \sqrt{Q}$$

3. Змінити значення КП ПА шляхом нагрівання ПА до температури  $T_i$ . Аналогічно п. 1 визначити фактичне значення КП ПА при температурі  $T_i - K_i$ .

4. Впливати на ПА тестовим імпульсом і визначити параметри перехідного процесу при температурі  $T_i$ ,  $Q_i$ ,  $f_{0i}$ ,  $\tau_i$ . Відповідно до [4], використовуючи отриману раніше константу  $C_A$ , визначити розрахункове значення КП  $K_{Pi}$  за формулою

$$K_{Pi} = C_A \sqrt{Q_i}$$

5. Визначити похибку обчислення розрахункового значення КП ПА по формулі

$$\delta_i = \frac{K_{Pi} - K_i}{K_i} \cdot 100\%$$

6. Визначити додаткову температурну похибку каналу вимірювання віброприскорення, викликану зміною КП ПА під впливом температури, за формулою

$$\delta_{ti} = \frac{K_i - K_0}{K_0} \cdot 100\%$$

7. Повторити п. 2-6 для різних екземплярів ПА.

Для реалізації запропонованої методики досліджень експериментальна установка повинна виконувати наступні функції:

1. Формування тестових імпульсів регульованої амплітуди  $U$  і тривалості  $T_{\text{имп}}$ .
2. Осцилографування сигналу на виході ПА з синхронізацією по тестовому імпульсу і з можливістю збереження осцилограми для подальшої обробки.
3. Вплив на досліджуваний ПА вібрацією з відомими параметрами.
4. Вимірювання середньоквадратичного значення параметра, яке пропорційне віброприскоренню, на виході досліджуваного ПА.
5. Зміна та підтримання температури досліджуваного ПА в робочому діапазоні температур ПА.

Досліджуваний ПА закріплений на штоку вібростенда, що здійснює зворотно-поступальні рухи в горизонтальному напрямку з частотою і амплітудою, обумовленими генератором. Форма коливань штока близька до синусоїдальної, частота і амплітуда задаються органами управління генератора. Для вимірювання фактичних параметрів вібрації штока на ньому встановлений другий ПА – контрольний. Досліджуваний ПА поміщений в термостат, керований терморегулятором. Терморегулятор спільно з термостатом забезпечують підтримку заданої температури досліджуємого ПА. Середньоквадратичне значення віброприскорення штока за допомогою досліджуємого ПА і контрольного ПА вимірюється багатоканальним контролером інтелектуального датчика вібрації Кідва [6]. Слід зазначити, що замість Кідва може використовуватися пара зарядових підсилювачів (ЗП1 і ЗП2) з підключеними до їх виходів вимірювачами середньоквадратичного значення. З метою фіксації відгуку досліджуваного ПА на тестовий імпульс до виходу зарядового підсилювача ЗП2 підключений цифровий запам'ятовуючий осцилограф.

Управління основними вимірювальними блоками, а також зчитування і аналіз отриманих даних здійснюються за допомогою персонального комп'ютера ПК. ПК забезпечує отримання з Кідва середньоквадратичне значення віброприскорення для контрольного ПА і досліджуваного ПА, управління блоком формування

тестового впливу з метою завдання параметрів тестового імпульсу, отримання і збереження осцилограм. Аналіз осцилограм (попередня фільтрація, обчислення параметрів  $Q$ ,  $\tau$ ,  $f_0$  згасаючих вільних коливань) і інші необхідні обчислення виконуються за допомогою програмного комплексу Matlab, що входить до складу програмного забезпечення ПК.

Блоком формування тестового впливу забезпечує формування тестового імпульсу з заданими параметрами.

Основним елементів блоку формування тестового впливу є мікропроцесорний контролер (МПК), керуючий ключем. У стані вимірювання ключ знаходиться у верхньому положенні, забезпечуючи підключення ПА до зарядового підсилювачу. При формуванні тестового імпульсу МПК переводить ключ в середнє положення, підключаючи ПА до регульованого джерела напруги.

Амплітуда тестового імпульсу  $U$  задається вручну і контролюється за допомогою вольтметра  $V$ . По закінченню часу  $T_{\text{ИМП}}$  МПК переводить ключ в нижнє положення, замикаючи висновки ПА на час  $T_{\text{ЗАМ}}$ , а потім знову переводить ключ у верхнє положення. Тривалості інтервалів  $T_{\text{ИМП}}$  і  $T_{\text{ЗАМ}}$ , а також період формування тестових імпульсів задаються програмно за допомогою ПК.

З використанням данної методики та експериментальної установки можна визначити параметри ПА, що застосовуються в системах вібромоніторингу турбоагрегатів [7].

## 1.2 Особливості повірки сейсмоприймачів

В наш час все більше зростає інтерес до сейсмоприймачів – високочутливим вібровимірювальним перетворювачам, які мають рівномірну АЧХ в області низьких частот. Вони використовуються при побудові сейсмічних локаторів для здійснення охоронної діяльності на територіях великих периметрів, для моніторингу сейсмічної активності, для захисту нафтогазових комунікацій, для проведення траєкторних випробувань. Також сейсмоприймачі знайшли своє застосування в системах діагностики і моніторингу технічного стану конструкцій, будинків, споруд і мостів.

Застосування сейсмоприймачів в діагностичних комплексах, що забезпечують безпеку стану трубопроводів, мостів, будівель і споруд, а також в системах моніторингу сейсмічної активності пред'являє високі вимоги до достовірності показань цих датчиків, оскільки від цього залежить надійність систем в цілому.

Будь-який первинний перетворювач тільки тоді може використовуватися в вимірювальних системах, коли простежується зв'язок між результатами досліджень, отриманих з його допомогою, з абсолютними стандартами одиниць відповідних фізичних величин. Цей зв'язок встановлюється в процесі повірки датчика. При цьому визначається ступінь точності, відтворюваності та достовірності результатів вимірювань повіреного перетворювача, а також встановлюються межі вимірювальних діапазонів [8].

Для сейсмоприймачів основними параметрами, які визначаються при перевірці, є дійсне значення коефіцієнта перетворення на базовій частоті, нерівномірність АЧХ і не лінійність АХ. При визначенні нерівномірності АЧХ проводять вимір коефіцієнта перетворення датчика в декількох точках частотного діапазону, при визначенні не лінійності АХ – в декількох точках амплітудного діапазону. Таким чином, основною дією при перевірці є визначення коефіцієнта перетворення, який розраховується як відношення напруги на виході сейсмоприймача до впливу на нього прискорення (1.1):

$$K = U/A \quad (1.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення сейсмоприймача [мВ/(м·с<sup>-2</sup>)],

$U$  – напруга на виході сейсмоприймача [мВ],

$A$  – прискорення, що впливає на сейсмоприймач [ $\text{м}/\text{с}^2$ ].

Таким чином, точність визначення коефіцієнта перетворення складається з точності вимірювання параметрів вібрації та відповідної напруги на виході сейсмоприймача.

### 1.2.1 Вибір метода вимірювань

Оскільки сейсмоприймачі є вібровимірювальними перетворювачами, визначення їх характеристик здійснюється за допомогою вібростенду. Сейсмоприймач встановлюється на вібростенд, який відтворює коливання заданої частоти і амплітуди. Параметри коливань контролюються зразковим датчиком, за показаннями якого визначається відтворюєме віброприскорення.

При визначенні параметрів вібровимірювальних перетворювачів, як правило, застосовується відносний метод вимірювань, при якому в якості зразкового датчика використовується акселерометр, який встановлюється співвісно з повіреним датчиком. Таким чином, на датчики впливає ідентичне прискорення, і показання зразкового акселерометра використовуються для визначення коефіцієнта перетворення повіреного датчика за формулою (1.1).

Рекомендований рівень віброприскорення при проведенні вібровипробування відносним методом згідно з ГОСТ Р 8.669-2009 повинен становити не менше  $10 \text{ м}/\text{с}^2$  [9]. Більшість вібростенді середнього класу мають робочу амплітуду вібропереміщень  $1 \div 2$  мм, але такі вібростенди не дозволяють проводити випробування на частотах нижче 10 Гц.

Тому для вирішення завдання визначення параметрів вібрації доцільно використовувати інші методи вимірювань.

## 1.2.2 Вибір датчика переміщення

Сучасний ринок пропонує велику різноманітність датчиків переміщення різних принципів дії, конструктивного виконання, метрологічних характеристик:

- енкодери,
- LVDT-датчики,
- ультразвукові датчики,
- індуктивні (вихроструміві) датчики,
- лазерні (оптичні) датчики.

Механічні датчики, такі як енкодери і LVDT-датчики, хоч і відповідають необхідним характеристикам точності, при проведенні вібровипробування не використовуються, оскільки мають високу інерційність через механічні контакти з контрольованою поверхнею, і більше підходять для статичних вимірювань.

Принцип дії ультразвукових датчиків відстані заснований на випромінюванні імпульсів ультразвуку і вимірюванні, поки звуковий імпульс, відбившись від об'єкта вимірювання, повернеться назад в датчик. При цьому досягається дозвіл до 0,2 мм. При проведенні вібровипробування потрібна велика точність вимірювань. Також обмеженням у використанні ультразвукових датчиків для вимірювання параметрів сейсмодатчиків є робочий діапазон частот даних перетворювачів.

Таким чином, для визначення вібрації переміщення при проведенні вібровипробування в області низьких частот залишається вибір між оптичними і вихрострумівими датчиками переміщення.

На рис. 1.4 показаний принцип роботи оптичного датчика переміщення. Лазер посилає через лінзу промінь, який відбивається від об'єкта і фокусується на лінійці з фотодіодів, яка перетворює світловий сигнал в електричний. Будь-яка зміна відстані до об'єкта викликає зміну кута відбитого променя і, отже, позиції, яку відбитий промінь займає на лінійці фотодіодів. Мікроконтролер обробляє сигнал від лінійки фотодіодів і перетворює його в аналоговий електричний сигнал [10].

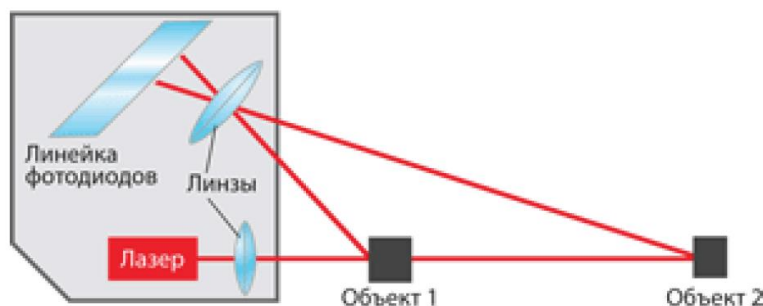


Рис. 1.4 Принцип роботи оптичного датчика переміщень

Чутливим елементом вихрострумових датчиків є котушка індуктивності, яка укладена в торці діелектричного наконечника (рис. 1.5). Датчик підключається до драйвера, який забезпечує збудження електромагнітних коливань в котушці, в результаті чого виникає електромагнітне поле, яке взаємодіє з матеріалом, що контролюється. Якщо матеріал має електропровідність, на його поверхні наводяться вихрові струми, які, в свою чергу, змінюють параметри котушки – її активний і індуктивний опір. Параметри змінюються при зміні зазору між контрольованим об'єктом і торцем датчика. Драйвер перетворює ці зміни в електричний сигнал, здійснює його лінеаризацію і масштабування [11].



Рис. 1.5 Принцип роботи вихрострумового датчика переміщень

Лазерний датчик вимагає фокусування перед кожним виміром, але має дуже високу повторюваність, оскільки основою вимірювань є дискретна величина – довжина хвилі лазерного випромінювача.

Вихорострумові датчики працюють в діапазоні амплітуд порядку декількох міліметрів без налаштування і є простішими у виготовленні, що робить їх дешевше оптичних датчиків, але вони вимагають більш часті перевірки, оскільки в основі вимірювань лежить час загасання коливань, який залежить від багатьох факторів крім відстані, що вимірюється.

До загальних переваг датчиків переміщення можна віднести високу точність вимірювання параметрів вібрації на низьких частотах і простоту калібрування, яку можна проводити шляхом переміщення датчика на відому величину.

### **1.2.3 Вплив зовнішніх факторів**

Все більш зростаючий інтерес до сейсмоприймачів пояснюється їх високою чутливістю в області низьких частот.

Достовірність показань будь-яких датчиків визначається при їх повірці. Повірка вібровимірювальних перетворювачів зазвичай проводиться на віброустановці, більшість з яких дозволяє відтворювати переміщення близько  $1\div 2$  мм, що забезпечує високу якість сигналу на частотах вище 20 Гц, але на більш низьких частотах рівень сигналу з датчика можна порівняти зі значенням електронних шумів і перешкод, викликаних навколишнім середовищем. Це висуває високі вимоги до умов, в яких проводяться випробування, для мінімізації впливу на показання зовнішніх факторів.

На низьких частотах через малий рівень сигналу з датчика в результуючий сигнал набагато більший внесок, в порівнянні з вимірами на високих частотах, вносять різні перешкоди:

- теплові впливи,
- імпульсні перешкоди,
- електронні шуми,
- магнітні впливи,
- вібраційні перешкоди.

Це пов'язано з тим, що на низьких частотах при малих переміщеннях, відтворених більшістю вібростендів, на датчик що повіряється впливає віброприскорення низького рівня, при цьому, сигнал, віддаємий датчиком, можна порівняти з рівнем перешкод. Тому для отримання достовірних результатів вимірювань слід провести ряд заходів для мінімізації впливу зовнішніх факторів.

Перш за все, слід виключити імпульсні перешкоди від силових установок поблизу випробувального комплексу, оскільки на низьких частотах рівень сигналу з датчика можна порівняти з рівнем електронних шумів, а імпульсні перешкоди завжди перевищують рівень електронних шумів. Таким чином, в умовах імпульсних перешкод спостерігаються скачки показань, і результат вимірювань багаторазово перевищує значення реально вимірюваного віброприскорення. Також слід максимально зменшити вплив зовнішніх магнітних полів на випробувальний комплекс.

При вимірюванні параметрів високочутливих датчиків в області низьких частот слід врахувати динамічний вплив навколишньої температури. Це коли швидка зміна навколишньої температури призводить до механічних деформацій корпусу вібродатчика, які передаються безпосередньо на п'єзоелемент. При повільних змінах температури подібні процеси не спостерігаються. Таким чином, слід також виключити рух повітряних потоків поблизу вимірювальної установки.

Значний внесок у результати вимірювань низькочастотних сигналів також можуть вносити механічні перешкоди. Тому для проведення вимірювань параметрів вібровимірювальних перетворювачів в області низьких частот потрібні спеціалізовані приміщення, що володіють хорошою звукоізоляцією і теплоізоляцією. Будівля має бути встановлена на спеціальному фундаменті і розташоване далеко від транспортних комунікацій: автомобільних магістралей, залізниць та аеропортів.

Крім того, для виділення корисного сигналу з показань сейсмоприймачів рекомендується використовувати вузькосмуговий спектральний аналіз, який дозволяє отримувати результати на частоті, що несе сигнал. Таким чином

високочастотні складові, наприклад, імпульсні перешкоди, не впливають на отримані дані.

Дотримання зазначених рекомендацій дозволить звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань сейсмоприймачів і проводити якісну повірку вібровимірювальних перетворювачів в області низьких частот.

#### **1.2.4 Вибір методу аналізу сигналів**

У зв'язку з тим, що на низьких частотах сигнал з датчика можна порівняти з величиною шумів вимірювальної електроніки, особливу увагу слід приділити виділенню корисного сигналу. Для цього використовується вузькосмуговий спектральний аналіз. В основі даного типу аналізу лежить принцип розкладання тимчасової реалізації сигналу в частотний спектр з рівномірним кроком по частоті за допомогою перетворення Фур'є [11].

Для оптимізації тривалості проведення випробувань необхідно врахувати взаємозалежність ширини смуги спектра і часу накопичення сигналу. Прохідна характеристика відображає залежність рівня сигналу від часу на певній частоті, ілюструючи процес накопичення сигналу при проведенні вузькосмугового спектрального аналізу. Чим вужче смуга аналізу, тим довше проводяться вимірювання.

Застосування вузькосмугового спектрального аналізу дозволяє виключити з результатів вимірювань вплив вібрацій від промислових установок, від коливань будівель, погодних і температурних впливів.

#### **1.2.5 Порядок перевірки**

Вимірювання в області низьких частот займають тривалий час. Наприклад, період сигналу частотою 1 Гц складає 1 секунду, частотою 0,1 Гц – 10 секунд. Повторюваність результатів забезпечується при вимірюванні з усередненням сигналу не менше ніж за 10 періодів. Таким чином, зняття показань з датчика на

частоті 1 Гц займає від 10 секунд, на частоті 0,1 – від 100 секунд (майже 2 хвилини). Крім того, при кожному вимірюванні потрібно неодноразова корекція сигналу генератора, який управляє вібростендом, для відтворення необхідного рівня вібрації. Це значить, що проведення вимірювань займає в 2-3 рази більше зазначеного часу. Дані розрахунки відображають мінімальний час, необхідний для вимірювань апаратурою, і не враховують час, що витрачається повірником на зняття показань вимірювального обладнання та обробку результатів вимірювань, в тому числі розрахунок прискорення зі значень переміщення для кожної частоти.

Таким чином, при проведенні вимірювань в області низьких частот особливо актуальною стає завдання автоматизації.

Сучасні засоби вимірювання дозволяють перетворювати показники датчиків переміщення в віброприскорення «на льоту» і, розділивши на нього показання повіреного датчика, відобразити на екрані кінцевий результат – коефіцієнт перетворення. При необхідності може розраховуватися віброшвидкість, таким чином, автоматизовані системи дозволяють перевіряти сеймоприймачі як з виходом по прискоренню, так і з виходом за швидкістю (велосиметри) і переміщенню.

При розробці автоматизованих систем закладається алгоритм зміни параметрів вимірювання для кожної частоти. Оскільки тривалість вимірювань залежить від ширини смуги спектрального аналізу, підбір даного значення для кожної частоти забезпечує, з одного боку, необхідну точність повірки, а з іншого боку – мінімально можливий час вимірювань.

Крім того, автоматична корекція сигналу генератора, керуючого вібростендом, також займає набагато менше часу, ніж при проведенні вимірювань вручну, оскільки в автоматичному режимі за показниками зразкового датчика, значенню поданої напруги і необхідним параметрам вібрації проводиться розрахунок поправки, на яку необхідно змінити напругу, що подається на вібростенд. Висока точність розрахунку дозволяє проводити корекцію напруги генератора з першого разу, в той час як при проведенні вимірювань в звичайному режимі це завдання вирішується за кілька ітерацій навіть досвідченим повірником.

При повірці сейсмоприймачів виникає ряд труднощів, як у визначенні параметрів вібрації, що впливає, так і у виділенні корисного сигналу сейсмоприймача. Проведення вимірювань в області низьких частот вимагає забезпечення певних умов для мінімізації впливу зовнішніх факторів на показники приладів. Для визначення параметрів вібрації рекомендується використовувати безконтактні датчики переміщення, а сигнал з сейсмоприймача аналізувати вузькосмуговим спектром. Автоматизація повірки дозволяє значною мірою знизити час і трудовитрати на даний процес і істотно збільшити продуктивність підприємств. Такий комплекс заходів дозволяє проводити перевірку сейсмоприймачів у всьому робочому діапазоні частот з високою точністю.

### **1.3 Огляд методів і засобів забезпечення динамічних випробувань і вібродіагностики приладів СОН**

#### **3.1 Основні принципи побудови автономних реєстраторів сигналів з п'єзоелектричними датчиками прискорення**

При створенні зразків нової техніки проводиться серія динамічних випробувань, як окремих вузлів, так і конструкції в цілому.

Випробування можна розділити на два класи:

- 1) вплив короткочасного навантаження;
- 2) постійне динамічне навантаження.

Залежно від розв'язуваних завдань, при випробуваннях техніки, вимірювальну інформацію можна розділити на інформацію:

- про поведінку об'єкта випробувань до дії вібрації;
- про поведінку об'єкта випробувань під час вібрації;
- про стан об'єкта випробувань після вібрації;
- про характер вібрації.

Для вирішення цих задач при випробуваннях об'єктів техніки існує необхідність в розробці і застосуванні малогабаритних, портативних, автономних

реєструючих засобів, що працюють безпосередньо на випробуваному об'єкті в умовах вібраційного навантаження [12].

Функціонування реєстратора безпосередньо на випробуваному об'єкті в умовах вібраційного навантаження пред'являє до реєстратора наступні спеціальні вимоги: малі габарити і маса; автономність; вібро- і ударостійкість; нечутливість до електромагнітних випромінювань; широкий діапазон температур. В таких умовах в багато разів зростає значення надійності апаратного і алгоритмічного забезпечення процесу вимірювання.

При цьому необхідно здійснити:

- 1) забезпечення автономності роботи реєструючих засобів на борту досліджуемого зразка техніки;
- 2) забезпечення синхронізації ходу реєстрації вимірювальної інформації;
- 3) зберігання та передачу інформації в ЕОМ з подальшим експрес – аналізом зареєстрованої інформації.

У відповідності зі сказаним, технічні вимоги до автономного реєстратора, які пов'язані з необхідністю роботи в автономному режимі в не обслуговуваному варіанті, можна розділити на три взаємопов'язані групи:

- функціональні вимоги;
- конструктивні вимоги;
- вимоги до електричного живлення.

Функціональні вимоги впливають з особливостей випробувань. Так як момент часу початку реєстрації параметрів невідомий, реєстратор повинен переходити з режиму очікування в режим вимірювання по синхронізуючим сигналам або безпосередньо від параметрів вимірюваного сигналу. У момент появи сигналу на інтервалі очікування або після приходу імпульсу синхронізації реєстратор повинен провести запуск і реєстрацію вимірювального сигналу, потім забезпечити режим зберігання зареєстрованої інформації з мінімальним енергоспоживанням і зчитування її в базову ЕОМ для обробки.

Таким чином, до функціональних вимог належать [13]:

- тривале очікування корисного сигналу;

- автоматична реєстрація всього процесу;
- автоматична ідентифікація початку корисного сигналу і реєстрація вимірюваного сигналу;
- прив'язка до єдиного часу протягом процесу вимірювання (синхронізація);
- забезпечення можливості зчитування інформації з реєстратора без її руйнування (контроль зареєстрованої інформації);
- тривале зберігання інформації з мінімальним енергоспоживанням.

Зберігати працездатність і виконувати свої функції реєстратор може лише при достатньому захисті від впливів навколишнього середовища. Це досягається при забезпеченні:

- герметичності конструкції для роботи в складних кліматичних умовах (запиленість, вологість);
- роботи в широкому діапазоні температур;
- ударо і виброміцності конструкції;
- автономністю і надійністю роботи реєстраторів.

Автономність реєстраторів – основна властивість, що забезпечує їх роботу на закритих і рухомих об'єктах техніки. Під ним розуміється енергетична, конструктивна і функціональна автономність (незалежність) реєстраторів при вимірах досліджуваних параметрів [14].

Функціонування реєстратора в автономному режимі безпосередньо на випробуваному об'єкті в умовах навантаження пред'являє до реєстратора спеціальні вимоги. Вони полягають в тому, що реєстратор повинен бути автономним, малогабаритним, високонадійним і мати мінімальний набір функціональних вузлів в каналі – це підсилювач, АЦП, мікропроцесор і запам'ятовуючий пристрій, а також не обслуговуватися. Всі інші необхідні функції повинні забезпечуватися за допомогою пульта управління і підключається до реєстратора під час проведення обслуговування і випробувань автономного реєстратора.

Функціональна автономність полягає в можливості реєстратора виконувати основні функції без керуючої команди «зовні». Передбачається, що підготовка до

роботи проводиться апріорно. Для забезпечення функціональної автономності реєстратор повинен володіти низкою властивостей [13]:

- внутрішнім управлінням роботою всіх елементів;
- автоматичним перекладом з режиму реєстрації в режим очікування або режим видачі інформації;
- можливістю програмування апріорно мінімального набору основних параметрів реєстратора.

Для забезпечення виконання вимог, що пред'являються до реєстратора необхідно використовувати наступні принципи і методи побудови реєстраторів:

- структурні методи забезпечення точності вимірювання та надійності функціонування;
- використання вібро- і термостабільних електронних компонентів;
- використання конструкційного демпфування плат і окремих електронних компонентів і амортизації електронних блоків та особливо блоку живлення реєстратора.

До основних критеріїв при виборі структури реєстратора відносяться [13]:

- забезпечення максимальних частотних і динамічних діапазонів без комутації коефіцієнта посилення і частотних характеристик каналу;
- забезпечення максимальної швидкодії (передискретизації) АЦП, максимальної розрядності АЦП і максимально можливого обсягу пам'яті;
- мінімізація числа структурних елементів реєстратора;
- забезпечення максимальної автономності каналів реєстратора;
- функціональна гнучкість розвитку структури реєстратора;
- мінімальне енергоспоживання при реєстрації і при зберіганні інформації;
- забезпечення високої надійності роботи реєстратора.

Слід особливо наголосити на проблемі забезпечення динамічного діапазону без комутації коефіцієнта посилення, оскільки рішення цієї проблеми усуває перевантаження (недійсні вимірювання) і дозволяє узгодити динамічний діапазон

датчиків і записуючого устаткування. Точне вимірювання при цьому виходить з першого разу навіть при використанні змішаних датчиків [15].

Структурні методи побудови надійних реєстраторів полягають в розробці таких структурно-функціональних схем, які дозволяють мінімізувати число окремих електронних компонентів в реєстраторі і париувати або виключати вплив їх відмови на роботу реєстратора в цілому. Наприклад, якщо багатоканальний реєстратор має тільки один вихід для виведення інформації і один загальний блок пам'яті, то відмова будь-якого елемента в пристрої виведення і блоку пам'яті призводить до відмови всього реєстратора. Для усунення цього необхідно забезпечити максимальну автономність роботи каналів реєстратора.

Структурні методи передбачають також дублювання найбільш відповідальних сигнальних зв'язків і шин живлення і забезпечення перешкодозахищеності вхідних і внутрішніх ланцюгів, що особливо важливо, оскільки обмеження на обсяг і вагу автономних реєстраторів носять досить жорсткий характер.

Для реалізації структурних методів побудови реєстраторів використовуються наступні алгоритми.

*Алгоритм побудови аналогової частини реєстраторів* включає в себе: мінімізацію впливу первинного перетворювача на досліджуваний процес або об'єкт; захист первинного перетворювача від паразитних явищ в об'єкті дослідження і незапланованого навколишнього впливу; захист вимірювального сигналу від низькочастотних перешкод; преддеформації вимірювального сигналу з метою розширення динамічного діапазону апаратури; забезпечення динамічного діапазону посилення сигналу; захист вхідних вимірювальних ланцюгів від електромагнітних перешкод; захист вимірювального сигналу від високочастотних перешкод і підміни сигналу при оцифрування.

*Алгоритм побудови цифрової частини реєстраторів* включає в себе: облік впливу оцифровки на достовірність одержуваних масивів даних; облік впливу параметрів АЦП і тактового генератора на похибки оцифровки; облік впливу розмірності і конфігурації буфера на можливості достовірної обробки і вилучення

інформації з масиву даних; можливості передискретизації по амплітуді і по часу для підвищення інформативності результатів; облік можливостей інтерфейсу.

*Алгоритм візуалізації і перевірки результатів вимірювань* включає в себе: вибір алгоритму інтерполяції при виведенні масиву даних на екран; відновлення вхідного сигналу; вибір процедури архівування та документування результатів дослідження; відповідність алгоритмів обробки поставленим завданням дослідника; номенклатуру математичних операцій; перевірку достовірності отриманих оцінок параметрів досліджуваних процесів; перевірку адекватності отриманого відновленого сигналу і його інтегралів (швидкості і переміщення) фізичної суті досліджуваних процесів.

Вібраційні випробування часто є унікальними і не відтвореними (слабо відтвореними) випробуваннями виробів в екстремальних умовах, що підвищує вимоги до калібрування та встановлення параметрів вимірювальних каналів приладів, які реєструють інформацію про характер поведінки виробів в процесі випробувань.

Поняття слабого відтворювання умов експерименту відноситься до області експериментальних досліджень, в якій дослідник не має можливості (з тих чи інших причин) повторити експеримент в тому ж вигляді, в якому він це зробив вперше. Це, наприклад, масштабні дорогі випробування з унікальними об'єктами, або випробування в умовах впливу факторів навколишнього середовища, які неможливо запобігти тощо.

Процес вимірювання при проведенні динамічних випробувань характеризується тим, що завжди апіорна інформація при проведенні випробувань про параметри впливу і поведінці конструкції має значний розкид, так як виходить на основі досить грубих оцінок. Крім того, процес вимірювання сигналів є динамічним, так як режим складеного засобу вимірів (реєстратора) вважається динамічним, якщо вхідний або вихідний сигнал хоча б для одного з вхідних в нього пристроїв є змінним [16].

У методологічному аспекті динамічні вимірювання представляють собою перехід від вимірювання скалярних величин до вимірювання векторних величин, від

вимірів з числовим результатом до вимірювань з результатом у вигляді функцій, тобто відносяться до спільних вимірів цікавлячої нас фізичної величини і часу [16].

Перехід від вимірювань конкретного параметра процесу до його реєстрації з похибкою, що не перевищує задану вимагає деталізації вимірювального завдання (наприклад, визначення частотного і динамічного діапазону) і вдосконалення конструкції вимірювального засобу (наприклад, захист від перешкод і зовнішніх впливів на датчики та реєстратор і забезпечення динамічного та частотного діапазону реєстратора).

Перетворення вимірювальної інформації при проведенні випробувань, як правило, здійснюється п'єзоелектричними датчиками прискорення різної чутливості. Дані датчики мають яскраво виражені резонансні властивості. Вибір п'єзоакселерометрів зводиться до того, щоб частота установочного резонансу перевищувала верхню частоту спектра сигналу прискорення, як правило, в три рази, а очікуване сумарне значення прискорення було менше межі діапазону лінійності акселерометра з запасом приблизно 30% [17]. Установчий резонанс п'єзоакселерометрів який знаходяться на випробувальному виробі можна визначити методом, запропонованим в [17]. Ап'риорна інформація при проведенні випробувань про параметри впливу і поведінці конструкції має значний розкид, так як виходить на основі досить грубих оцінок. Тому при проведенні випробувань спектр впливу може досягати резонансної частоти датчика, що може призводити до перевантаження датчика і вимірювального каналу та низькочастотних складових сигналу, що не підтверджуються динамікою руху об'єкта випробувань.

Для захисту вимірювального каналу від наведень, датчика від перевантажень, і часткової механічної фільтрації вібраційного впливу використовують установку п'єзоакселерометрів на ізолюючу в'язку прокладку, виконану з гумових матеріалів. Отже, розрахунок ступеня ослаблення і фільтрації прискорення від вібраційної дії прокладкою є актуальним завданням, оскільки дозволяє оцінити рівень впливу на датчик і рівень сигналу до випробувань і зменшити ймовірність спотворення інформації і фактичного зриву випробувань.

Крім того, досить низькочастотна дія може супроводжуватися високочастотними механічними збуреннями, що також призводить до перевантаження вимірювального каналу. Регулювання коефіцієнта посилення і частотних характеристик каналу в автономному реєстраторі здійснювати дуже важко (а в процесі випробувань і взагалі неможливо), оскільки це пов'язано зі зниженням надійності реєстратора, апаратними та енергетичними затратами. Тому при розробці автономних реєстраторів гостро постає проблема забезпечення динамічного діапазону вимірювального каналу реєстратора при заданій точності реєстрації вібраційного сигналу безкомутаційним способом, тобто без перемикання коефіцієнта посилення і зміни частотних характеристик каналу.

Для забезпечення динамічного діапазону реєстратора можлива низькочастотна фільтрація сигналу (обмеження смуги пропускання в області низьких частот) наступним його відновленням в ЕОМ за відомою передатної функції каналу, частотне спотворення сигналу фільтром в області високих частот так само з подальшим відновленням сигналу в ЕОМ за відомою передавальної функції фільтра [17].

Тому структурні методи повинні передбачати розробку алгоритмів і програмного забезпечення (ПЗ) для швидкого відновлення сигналів після відомого частотного спотворення сигналу в каналі реєстратора. Крім того, розробку методів визначення параметрів і працездатності первинних вимірювальних перетворювачів за результатами тестових впливів на них і вихідним сигналам реєстратора. Теорія методів такого визначення параметрів вимірювальних перетворювачів першого і другого порядків викладена в [18], а в роботі [19] викладено експериментальні методи контролю технічного стану п'єзоелектричного акселерометра при експлуатації.

### **1.3.2 Методи гармонічних вібраційних випробувань виробів**

Метою кожного випробування є встановлення певних властивостей досліджуемого об'єкта з метою контролю його якісних характеристик.

При механічних випробуваннях можна перевірити об'єкт на функціонування (випробування на віброміцність) і досліджувати його міцність (випробування на віброміцність). Контроль віброміцності є одним з найбільш відповідальних видів механічних випробувань. В даний час прийняті наступні групи тимчасових функцій механічного впливу на об'єкт [20]:

- Синусоїдальні вібрації (гармонійне вплив);
- Стохастичні вібрації;
- Комбіноване навантаження виробу.

В ряду механічних випробувань гармонійне вібраційне навантаження займає особливе місце завдяки своїй універсальності і точності як в плані отримання передатних характеристик випробовуваних об'єктів, так і в плані нормування перевантажень.

Найбільш поширені види випробувань на вплив гармонійної вібрації:

- випробування з фіксованою частотою;
- випробування з попереднім визначенням резонансних частот;
- випробування із заданим поруч фіксованою частотою вібрації;
- випробування на полігармонічну вібрацію;
- випробування з плавно мінливою частотою.

Три перші види випробувань є однаковими з точки зору впливу – це гармонійна вібрація фіксованої частоти. Час впливу перевищує час заспокоєння конкретного резонатора. Ці випробування мають спільні недоліки в плані придатності для автоматизації (для кожного зразка повинна бути індивідуальна програма) і повноти випробувань складних механічних систем.

Випробування на полігармонічні вібрації застосовуються в основному тоді, коли об'єкт в реальних умовах експлуатації відчуває вплив навантаження з детермінованим періодичним характером (турбомашини, насоси, генератори тощо). При широкому діапазоні відтворюваних частот метод досить складно реалізувати, оскільки вимагає великого числа незалежних генераторів синусоїдального сигналу з регулюванням фазового зсуву між ними.

Тому значно більшого поширення набули випробування з плавно змінювальною частотою. При цих випробуваннях по мірі зміни частоти вплив від  $f_H$  (початкова частота випробувань) до  $f_K$  (кінцева частота випробувань) кожен резонатор або мода коливань опиняються в режимі резонансу. Інтенсивність випробувань характеризується параметром  $A$  – амплітудним значенням прискорення впливу. Залежно від умов і завдань випробувань амплітуда прискорення  $A$  може залишатися незмінною в процесі розгортки частоти або змінюватися за певним законом.

Закон зміни частоти від часу визначається необхідною тривалістю навантаження для різних елементів конструкції:

- Тривалість дії на всі елементи (або моди коливань) повинна бути однаковою по часу;
- Кількість циклів зміни навантаження повинно бути однаковим для всіх елементів (або мод коливань).

Цим двом законам зміни частоти відповідають наступні аналітичні вирази:

$$\Delta t_0 = const; f = f_H \exp(t/\tau); \tau = \frac{T_z}{\ln(f_K/f_H)}; \quad (1.2)$$

$$\Delta n_0 = const; f = \frac{f_H}{1-t/\tau}; \tau = \frac{T_z}{1-f_H/f_K}; \quad (1.3)$$

де  $f_H$  та  $f_K$  – початкове і кінцеве значення частоти гармонійного впливу;  $\Delta n_0$  – число циклів зміни навантаження;  $T_z$  – тривалість циклу випробувань;  $\Delta t_0$  – тривалість впливу;

У переважній більшості випадків постійною вважають тривалість впливу для всіх елементів (або мод коливань)  $\Delta t_0 = const$ , а постійна часу наростання  $\tau$  визначає швидкість зміни частоти.

Оскільки об'єкт, що випробовується і вібростенд мають власні резонанси на різних частотах, що надходить на вібростенд потужність залежить від частоти. Отже, її необхідно автоматично регулювати з урахуванням забезпечення фіксованого значення (або змінюваному по якому-небудь закону) певного параметра

механічних коливань об'єкта на всіх частотах. З цією метою в генераторах механічних коливань передбачають спеціальні пристрої стиснення динамічного діапазону. У комплексі з закріпленими на столі вібратора і об'єкті випробувань датчиками і передпідсилювачами ці пристрої утворюють автоматичні керуючі системи [21]. Часто такі системи оснащуються пристроями реєстрації інформації про процеси в об'єкті (рис. 1.6).

Істотним є кількість точок прикладання до механічної системі збуджуючої сили. Розрізняють одноточкове і багатоточкове збудження. Хоча в реальних умовах експлуатації механічна система може відчувати збудження від кількох джерел вібрації, в практиці випробувань багатоточкове збудження не знайшло широкого застосування.

Це пов'язано не тільки з труднощами реалізації багатовимірного навантаження і обробки його результатів, а й з частою вимогою одноточкового збудження при випробувальних і дослідницьких завданнях. Зокрема, в задачах визначення частотних характеристик механічної системи потрібна підтримка заданого навантаження в одній точці, прийнятої за вхід системи.

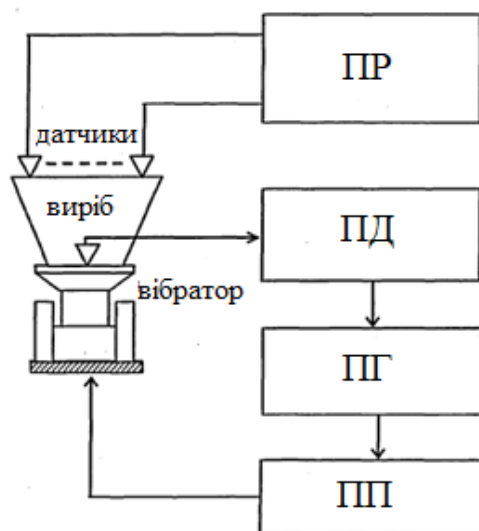


Рис. 1.6. Типова схема для вібровипробування з розгорткою синусоїдального сигналу: ПР – пристрій реєстрації, ПД – підсилювач датчика, ПГ – програмуємий генератор, ПП – підсилювач потужності.

Алгоритми роботи систем управління навантаженням механічних систем при гармонійному впливі з розгорткою по частоті спрямовані на підтримку в процесі розгортки необхідного рівня навантаження при впливі всіх згаданих чинників. Аналіз літератури з даного питання показує, що в цілому алгоритми управління гармонійним вібраційним навантаженням можна розбити на дві великі групи за кількістю точок знімання інформації (рис. 1.7): одноточкові і багатоточкові [22].

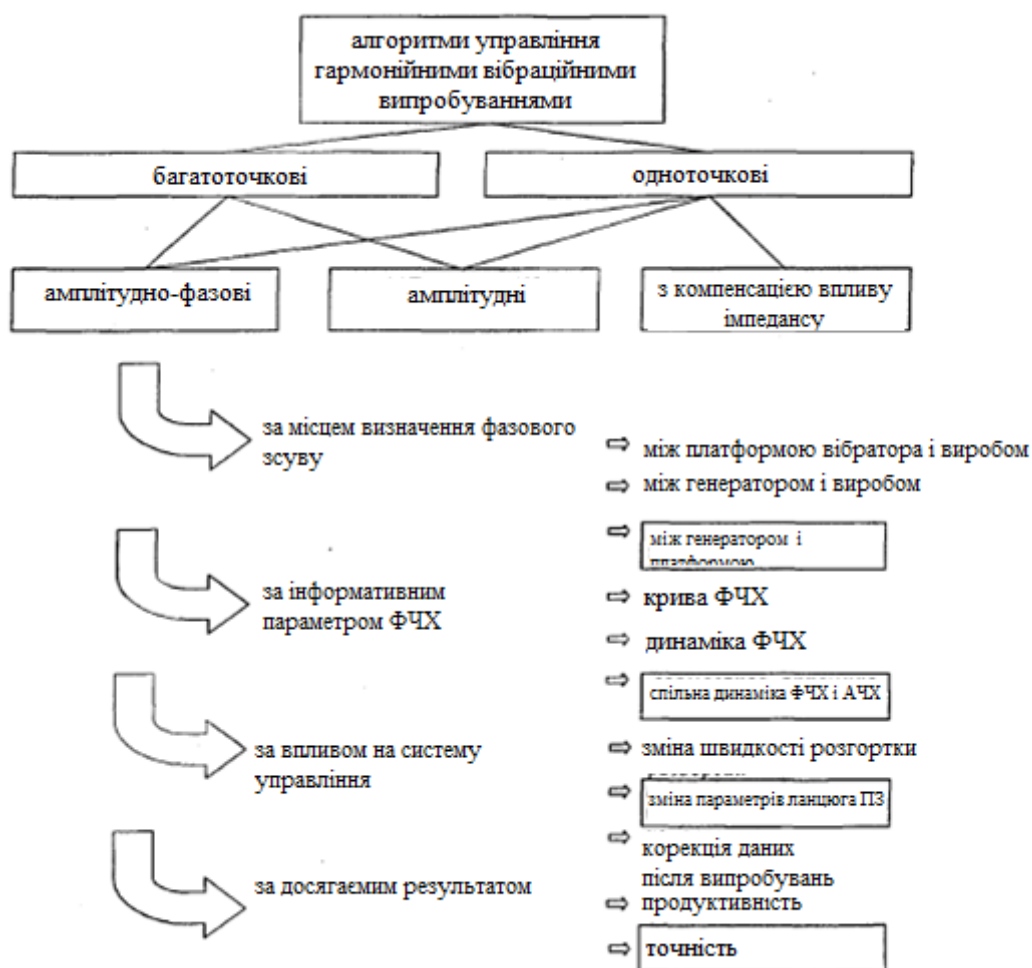


Рис. 1.7 Класифікація алгоритмів забезпечення гармонійного вібраційного навантаження (виділені ознаки пропонованого алгоритму) просторово складних структур, небезпека перевантаження і руйнування яких має велике значення.

Класифікація наступних груп алгоритмів лежить в іншій площині, (вони можуть бути одно- і багатоточковими) – за кількістю використовуваних для управління параметрів відгуку виробу на вібраційний вплив:

- амплітудні;
- амплітудно-фазові;

- з компенсацією впливу імпедансу.

Амплітудні алгоритми використовуються переважно в найпростіших системах управління і містять підгрупу алгоритмів з обчисленням похідної зміни амплітуди в процесі розгортки частоти. Це дозволяє адаптувати швидкість розгортки до крутизни зміни амплітуди і тим самим забезпечити точність навантаження.

Більш цікава, яка одержала широке поширення група амплітудно-фазових алгоритмів, які дають більшу маневреність в питаннях підвищення точності і продуктивності випробувань.

Класифікація їх виглядає наступним чином:

1 група – за місцем визначення фазового зсуву:

- між платформою вібратора і відгуком виробу;
- між генератором і відгуком виробу;

2 група – по інформативному параметру фазової характеристики:

- крива ФЧХ, дискретність  $\pi/2$ ;
- крива ФЧХ, дискретність одиниці градусів;
- спільна динаміка АЧХ і ФЧХ;

3 група – по впливу на систему управління:

- прямий вплив на швидкість розгортки;
- відсутність прямого впливу (результат досягається після обробки);

4 група – за досягаємих результатом:

- підвищення продуктивності;
- підвищення точності;
- комплексний результат.

Для систем управління вібронавантаженням при контролі віброміцності амплітудно-фазові алгоритми грають найважливішу роль, так як дозволяють в більшості випадків обходитися однокерованими системами управління, що часто визначаються умовами випробувань.

Загальним недоліком перерахованих амплітудно-фазових алгоритмів є відсутність обліку взаємодії досліджуваного об'єкта і джерела вимушеної сили

(вібратора) [23]. Це призводить до виникнення нестійкості системи управління в проблемних зонах частотної характеристики об'єкта і похибок в підтримці заданого рівня навантаження.

Слід зазначити, що маса платформи вібратора, на якій кріпиться випробуваний об'єкт, відносно мала, тому зворотний вплив випробовуваних об'єктів досить значний. Особливо суттєве спотворення передатного коефіцієнта вібраційної установки відбувається в разі наявності у об'єкта випробувань яскраво виражених резонансних властивостей. На рис. 1.8 показана частотна характеристика вібраційної установки при зворотному впливі досліджуваного об'єкта з резонансними властивостями.

Чисельною характеристикою зворотного впливу є так званий коефіцієнт зворотного впливу:

$$A_R(\omega) = \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q_P}\right)^2}{\left[(1 + \mu) - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q_P}\right)^2}} \quad (1.4)$$

тут  $\mu$  – коефіцієнт інерційності, який визначається за формулою:

$$\mu = \frac{m_{PS}}{m_T + m_{PF}} \quad (1.5)$$

де  $m_{PS}$  – маса досліджуваного об'єкта,  $m_T$  – маса платформи,  $m_{PF}$  – маса корпусу вібратора,  $Q_P$  – добротність резонансу об'єкта випробувань.

Для електродинамічних установок коефіцієнт  $\mu$  зазвичай значно більше, ніж для інших типів віброустановок, тому можливі значні зміни передатних властивостей в робочому діапазоні частот.

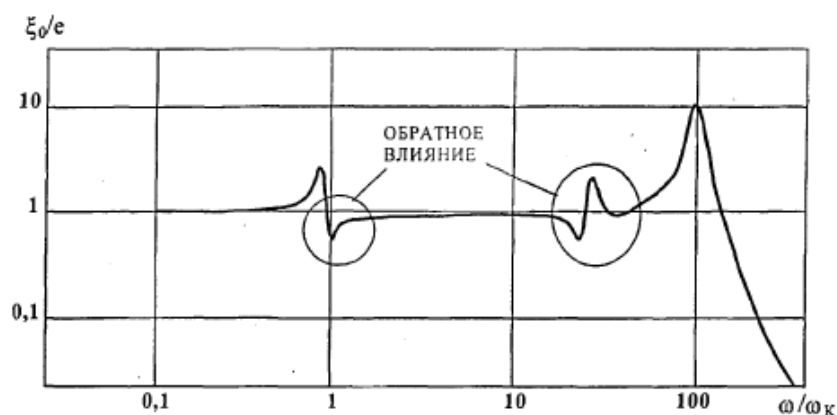


Рис. 1.8. Частотна характеристика вібраційної установки при зворотному впливі досліджуємого об'єкта з резонансними властивостями:  $\xi_0$  – амплітуда коливань платформи,  $e$  – постійна амплітуда коливань генератора на виводах котушки збудника,  $\omega_0$  – власна частота коливань виробу,  $\omega$  – змінна частота коливань генератора.

Внаслідок цього необхідні спеціальні заходи при випробуваннях з повільно змінною частотою.

При випробуваннях методом коливальної частоти управління заданим режимом проводиться за інформацією, отриманою в одній (контрольній) точці кріплення виробу до столу вібратора. Амплітуди коливань в інших точках можуть істотно відрізнитися від заданої амплітуди коливань. Це може привести до значного зниження достовірності результатів випробувань, і виріб може бути недовипробувано або перевипробувано. Тому часто використовуються багатоточкові системи управління.

З метою підвищення достовірності результатів випробувань в вібросистемах рекомендується використовувати спеціальні пристрої – селектори (усереднювачі) [21]. Вони дозволяють управляти режимом випробувань за інформацією, отриманою в результаті одночасного вимірювання параметрів режиму випробувань в декількох точках виробу. Існує багато способів формування сигналу управління за допомогою селекторів. Вони диктуються вимогами до вібраційних випробувань конкретного виробу. Серед основних способів можна назвати наступні: способи максимального,

мінімального і середнього рівнів; векторного усереднення миттєвих пікових значень сигналів; усереднення абсолютних миттєвих пікових середніх або середньоквадратичних значень сигналів; векторного усереднення миттєвих пікових значень прискорень трьохкомпонентного вібровимірювального перетворювача; усереднення сигналів, отриманих з декількох трьохкомпонентних акселерометрів. Наприклад, для реалізації способу максимального рівня необхідно, щоб селектор автоматично одночасно порівнював сигнали, що надходять від усіх перетворювачів, і вибирав найбільший з них. Далі цей сигнал надходить на схему управління.

Перевага селектора максимального рівня полягає в практично повному виключенні можливості перевипробування виробу, недолік – можливість істотного недовипробування.

Спосіб мінімального рівня полягає у виділенні селекторами найменшою амплітуди коливань з амплітуд всіх контрольованих точок і управлінні цією величиною при зміні режиму випробувань. В інших точках амплітуда коливань може бути істотно більше необхідного рівня, що призводить до перевипробування виробу. Тому метод не знайшов широкого застосування.

Найбільш оптимальним є метод середнього рівня, при якому усувається небезпека перевантаження і зводиться до мінімуму можливість недовипробування виробу. В процесі вібровипробування з використанням селектора середнього рівня підтримується постійне середнє прискорення для всіх контрольованих точок. Однак і цей метод не позбавлений недоліків, так як у міру зростання частоти впливу з процесу активних коливань виключаються коливальні ланки з низькими резонансними частотами, що веде до недостовірності середнього значення рівня коливань.

При векторному усередненні миттєвих пікових значень сигналів, отриманих з декількох перетворювачів, сума векторів може дорівнювати нулю. В цьому випадку при підтримці заданого режиму виріб піддається впливу граничних навантажень і може вийти з ладу.

Основний недолік методів усереднення по абсолютній величині миттєвих пікових значень, за середнім або середньоквадратичним значенням пов'язаний з тим,

що при зменшенні прискорення в одних контрольованих точках, в інших воно (прискорення) пропорційно збільшується, що веде до перевипробуванню виробу і перевантаження відповідних каналів селектора.

З усіх перерахованих методах усереднення найширшого розповсюдження отримав метод усереднення середніх значень сигналів. Він полягає у визначенні середнього значення для кожного сигналу, підсумовуванні їх і розподілі отриманої суми на число контрольованих точок.

Всі описані методи вібраційного навантаження мають малу адаптивність до змінюваних умов випробувань і не враховують можливості підвищення динамічності в поведінці амплітуди прискорення виробу. Недоліком цих пристроїв є невисока точність підтримки заданого рівня вібронанавантаження в умовах відсутності інформації про частотні характеристики об'єктів (наприклад, типу тонкостінних консольних конструкцій) при випробуваннях на вплив гармонійної вібрації. Якщо до того ж виріб зі знизеним запасом міцності (або будь-якої її конструктивний елемент) при випробуваннях починає коливатися з досить високою амплітудою, то можливий перехід її в зону хаотичних коливань, що створює для традиційних систем управління великі складності.

Підвищення точності багатоточкових (багатовимірних) систем управління гармонійними вібраційними випробуваннями полягає в переході до формування сигналу управління в адаптивному лінійному суматорі реалізованого за допомогою багатоканальних цифрових регуляторів або адаптивного визначення частотного діапазону зворотного впливу.

### **1.3.3 Приводи мікропереміщень і вібратори з пружньо-деформуванням актюатором**

Для створення виконавчих приводів для систем адаптивної оптики і прецизійних систем управління доводиться відмовлятися в приводах від пар із зовнішнім тертям, які викликають неконтрольовані стрибки переміщень приводу, і переходити до приводів з пружньо-деформуванням актюатором.

У пружно-деформованих актюаторів переміщення відбуваються за рахунок деформації конструкції. Тертя і гістерезис значно менше і визначаються внутрішніми контрольованими параметрами матеріалу, з якого виготовлений актюатор. Крім того, пружно-деформовані актюатори за рахунок простоти своєї конструкції, викликані відсутністю кінематичних пар зовнішнього тертя, дозволяють створювати мікроелектроприводи. Мікроелектроприводи складають одну з важливих компонент нової області техніки, яка іменується мікромеханіка, мікрокерування або мікросистемотехнікою (МСТ).

До пружно-деформованих актюаторів з різним принципом дії відносяться: пьезокерамічні, біморфні пьезокерамічні, електродинамічні, магнітоелектричні і магнітострикційні, термічні і з пам'яттю форми.

Магнітострикційні приводи також можуть бути використані в системах активного віброзахисту, системах управління та мікроуправління, а, також, знайшли застосування в оптичних системах наведення і пристроях адаптивної оптики.

Магнітострикційні приводи і вібратори є прикладом використання пружно-деформованих актюаторів. Принципова відмінність магнітострикційних актюаторів від електромагнітних актюаторів полягає в тому, що зусилля, які розвиваються, виникають за рахунок внутрішніх напружень в тілі актюатора. При переміщенні (ході) порядку декількох десятків мікрон і значних зусиллях застосовують актюатори засновані на ефекті лінійної магнітострикції. Ці актюатори мають високу подовжню жорсткість, але значну температурну нестабільність порівнянну з робочим ходом.

Наступним новим видом магнітострикційних актюаторів є актюатори. Вони розвивають менші зусилля, але мають значно більший робочий хід порядку декількох міліметрів. Квантування (дискретність) ходу актюаторів визначається величиною дискретної зміни намагніченості в матеріалі актюатора.

Для трансформації кутових переміщень, що виникають в перетині прямолінійного стержня в лінійні переміщення стержня необхідно зігнути його, перетворивши в криволінійний, наприклад, в циліндричну гвинтову пружину або плоску спіраль. Пружно-деформовані актюатори є двухзаходні циліндричні

гвинтові або плоскі спіралі, виконані з магнітострикційного матеріалу. На рис. 1.9 зображено двухзаходна циліндрична гвинтова пружина і плоска двухзаходна спіраль Архімеда.

Наявність двох заходів створює силову симетрію і дозволяє замкнути ланцюг струму поляризації, а також аксіальний магнітний потік в стержні, що значно підвищує ефективність роботи актюаторів. На заходи спіралі намотують електричні обмотки для збудження або поляризації актюатора.

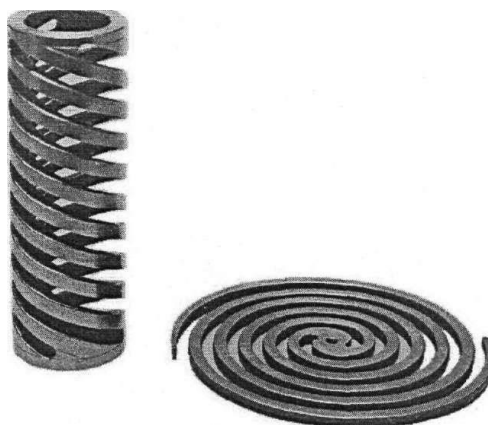


Рис. 1.9 Двохзаходна циліндрична пружина і спіраль Архімеда

Вибір типу поляризації та порушення приводів обумовлений розмірами перетину стержня, кроком заходу і числом витків заходу пружини або спіралі. При малому кроці заходу і малому числі витків заходу застосовують аксіальну поляризацію і збудження струмом в стержні. Це обумовлено тим, що обмотка не поміщається в просторі між заходами. Поляризація в цьому випадку здійснюється за допомогою постійних магнітів, що вимагає досить великого перерізу стержня і досить малої довжини осьової лінії заходу для зменшення магнітного опору кола поляризації і неоднорідності поляризуючого поля уздовж осьової лінії.

При досить великому кроці і числі витків заходу застосовують циркулярну поляризацію і збудження струмом в обмотці. Обмотка в даному випадку добре поміщається між заходами. Поляризація здійснюється струмом, що протікає по стержні, що вимагає обмеження перетину заходу, але не накладає обмежень на число витків заходу при заданому струмі поляризації. Наприклад, для забезпечення роботи актюатора з циркулярною поляризацією по стержню необхідно пропустити струм поляризації з щільністю порядку 0,5-4 А/мм. Такий тип поляризації краще

тим, що поле поляризації однорідно уздовж осьової лінії стержня і струм збудження в обмотці порядку (0,3-0,5) А, що значно менше струму збудження в стуржні.

Величина переміщення вільного торця пружини або центру плоскої спіралі при заданому вихідному зусиллі в заданій частотній області є основним робочим параметром приводу.

Створення методу проектування лінійних, двокоординатних виконавчих приводів або активних трьохкоординатних підвісів систем віброзахисту на основі пружно-деформованих актюаторів є актуальним завданням. Для вирішення цього завдання необхідно створити математичні моделі роботи актюаторів. Для створення моделей необхідно мати рівняння руху актюатора при різних способах його кріплення і різних навантаженнях, фізико-механічні параметри матеріалу і найголовніше параметри, що характеризують силові характеристики і їх залежність від величини осьових і циркулярних полів.

Слід зазначити цікаву сферу застосування пружно-деформованих актюаторів, створення на їх основі низькочастотних гідроакустичних випромінювачів і приймачів. Крім того, дані актюатори допоможуть використовуватися в якості вібраторів, наприклад, в системах розходжування свердловин і вібротехнологіях.

### **Висновки до розділу**

Даний розділ магістерської дисертації присвячений загальному опису об'єктів дослідження. На основі огляду літературних джерел було:

- описано основні засоби для низькочастотної діагностики споруд і будівель;
- проаналізовано стан і перспективи підвищення функціонування автономних засобів вібраційних випробувань з метою підвищення точності і скорочення часових затрат;
- представлено методику для дослідження параметрів п'єзоакселерометрів;
- показано особливості перевірки сейсмоприймачів малих і великих переміщень;
- проведено огляд методів і засобів забезпечення динамічних випробувань і вібродіагностики приладів СОН.

## РОЗДІЛ 2

### ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВІБРОВИМІРЮВАННЯ

#### 2.1 Нормування основних метрологічних характеристик лінійних низькочастотних акселерометрів

Акселерометри працюють як правило, в умовах одночасної дії цілого ряду фізичних величин (температури, вібрації та ін.). Однак визначати похибки в процесі перевірки по зразковим або повірочним засобам в цих умовах, як правило, не представляється можливим, оскільки зразкові і повірочні кошти не можуть працювати поза області нормальних або встановлених для них значень впливаючих величин (в іншому випадку похибка цих коштів стає неприпустимо великий). Тому в розроблених методиках [25-28] при оцінці похибки результату вимірювання, виконаного приладом використаний принцип визначення приватних складових похибок вимірювання з подальшим їх підсумовуванням. Визначати значення цих приватних складових можна експериментальним або розрахунковим шляхом, а також на основі використання результатів попередніх вимірювань. Всі приватні складові похибки слід розділити на дві групи:

- 1) похибки при нормальних умовах експлуатації засобів вимірювань;
- 2) похибки, обумовлені відхиленням впливаючих величин від своїх нормальних значень або областей нормальних значенні.

Способи визначення похибок першої групи широко відомі і засновані на повірку приладів за допомогою зразкових і повірочних засобів. Для знаходження похибок другої групи необхідно знати функції впливу і закони розподілу відповідних впливаючих величин.

Таким чином, для акселерометрів не вдається встановити одну узагальнену характеристику точності, подібну, наприклад, класу точності у інших засобів вимірювань, для яких відхилення впливаючих величин від нормальних значень не

грають такої істотної ролі.

Найбільш розумним представляється шлях нормування групи метрологічних характеристик, знання яких, а також умови експлуатації акселерометрів дають можливість споживачеві, з одного боку, в кожному конкретному випадку визначити похибку виконання вимірювань а, з іншого, вибрати прилад для вирішення конкретного завдання. Саме цей шлях по суті регламентований ГОСТ 8.009-72 «ГСИ. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювання». Вибір складу нормованих метрологічних характеристик акселерометрів залежить від типу приладу і від розв'язуємих їм завдань. Разом з тим для більшості приладів можна вказати орієнтовний перелік основних характеристик:

1. статична характеристика;
2. похибка в нормальних умовах застосування приладу;
3. динамічні характеристики;
4. функції впливу;
5. група метрологічних характеристик приладу, необхідних для правильної його експлуатації та повірки:
  - a. орієнтація вимірювальної осі щодо базових елементів системи кріплення і установки;
  - b. положення центра інерції чутливого елемента щодо тих же елементів;
  - c. метрологічні характеристики систем кріплення і установки.

Для інтегруючих акселерометрів і акселерометрів, вихідний сигнал яких в подальшому інтегрується, доцільно виділити в окрему групу постійні складові деяких похибок і нормувати характеристики, які служать джерелами їх появи.

Розглянемо послідовно перераховані вище характеристики.

### **2.1.1 Статична характеристика акселерометра**

Статичною характеристикою називають залежність вихідного сигналу акселерометра від постійного прискорення. Оскільки ідеально постійних фізичних величин в природі не існує, постійним прискоренням тут і далі будемо називати

таке прискорення, яке для даного конкретного завдання буде задовольняти нас ступенем наближення [29].

Як правило, в якості номінальної статичної характеристики акселерометра вибирають лінійну залежність вихідного сигналу від прискорення, і похибки приладів розглядають щодо цієї залежності. Іноді при індивідуальному градуванні акселерометра з метою підвищення точності вимірювань статичну характеристику представляють у вигляді полінома

$$X_{вих} = \sum_{i=0}^n k_i a^i \quad (2.1)$$

де  $X_{вих}$  – вихідний сигнал акселерометра.

При роботі акселерометра в автоматичних системах використовувати залежність (2.1) не завжди зручно, так як це пов'язано з введенням додаткових обчислювальних пристроїв, що працюють в реальному часі.

Оскільки при розробці акселерометрів, як правило, використовують принципи і пристрої, що забезпечують лінійність статичної характеристики, члени полінома (2.1), що характеризують відхилення від лінійності, пов'язані з недосконалістю конструкції приладу, і в процесі розробки акселерометра їх вплив прагнуть максимально знизити. Зазвичай в паспорті акселерометра (поряд з лінійною статичною характеристикою) приводять допустиме значення нелінійності.

### **2.1.2 Похибка в нормальних умовах застосування приладу (основна похибка)**

Особливістю низькочастотних лінійних акселерометрів є їх виключно широкий діапазон вимірювань: для деяких типів приладів відношення верхньої межі вимірювань до нижньої досягає 6-7 порядків (іноді це відношення називають «динамічним діапазоном»). Такий широкий діапазон вимірювань можливий тільки при отриманні від акселерометра всієї наявної інформації про величину, що вимірюється, тобто у разі, коли нижня межа вимірювання практично збігається з порогом чутливості. Тоді відносна похибка вимірювання прискорення на нижній межі максимальна. З ростом прискорення ця похибка зменшується, досягаючи

зазвичай мінімального значення на верхній межі вимірювання. Для більшості акселерометрів доцільно нормувати похибку за формулою

$$\Delta = \Delta_0 + \delta a \quad (2.2)$$

де  $\Delta_0$  – яка не залежить від прискорення складова абсолютної похибки, іноді звана адитивної складової похибки;  $\delta a$  – лінійна залежність від прискорення (мультиплікативна) складова абсолютної похибки;  $\delta$  – постійний коефіцієнт (похибка чутливості).

При такому записі похибки акселерометра слід визнати розумним пропозицію [30] вважати порогом чутливості значення  $\Delta_0$ , тобто таке значення прискорення, при якому похибка акселерометра дорівнює 100%. Надалі під порогом чутливості акселерометра будемо розуміти саме це значення.

Вираз (2.2) для відносної похибки акселерометра може бути записано і в іншому вигляді (ГОСТ 13600-68):

$$\delta(a) = \delta_{e.n.} + \delta_0 \left( \frac{a_{e.n.}}{a} - 1 \right) \quad (2.3)$$

де  $\delta_{e.n.}$  – похибка на верхній межі вимірювання;  $\delta_0$  – приведена похибка на нижній межі вимірювання,  $\delta_0 = \frac{\Delta_0}{a_{e.n.}}$   $a_{e.n.}$  – прискорення на верхній межі вимірювання.

У ряді випадків у акселерометрів нормують наведену похибку

$$\Delta_{np} = \delta_{e.n.} \cdot a_{e.n.}$$

що веде до зниження характеристик точності в нижній і середній частинах діапазону вимірюваних прискорень і не є виправданим з точки зору фізичної природи похибок більшості широкодіапазонних приладів.

У загальному випадку кожен з членів виразу (2.2) повинен бути представлений характеристиками своїх систематичних і випадкових складових, проте в більшості реальних випадків одна зі складових є домінуючою, що спрощує запис і користування виразом. Можливі форми подання систематичних і випадкових складових похибки регламентовані ГОСТ 8.009-72.

### 2.1.3 Динамічні похибки

Як правило, динамічні похибки при вимірюванні прискорень є домінуючими. У кожному конкретному випадку використання акселерометра необхідно, знаючи динамічні його характеристики і умови вимірювань, прогнозувати можливу динамічну похибку. Як і при знаходженні інших частних похибок, для визначення динамічної похибки необхідно знати:

- а) Вид і характеристики вимірюваної величини (в тій чи іншій формі);
- б) динамічну характеристику акселерометра (по суті функцію впливу частоти вхідного сигналу).

В практиці вимірювання параметрів руху в якості цієї характеристики найбільш часто використовують:

- 1) сукупність коефіцієнтів диференціального рівняння, що описує роботу приладу, або передатну функцію;
- 2) перехідну функцію приладу;
- 3) комплексну частотну характеристику (сукупність АЧХ і ФЧХ приладу).

Залежно від вибору тієї чи іншої характеристики для проведення відповідних розрахунків вимірювану величину необхідно подати до відповідного виду.

У першому випадку динамічна похибка акселерометра по виходу

$$\Delta a_{\partial} = L \left[ \frac{a(p)H(p)}{H(0)} \right] - a(t) \quad (2.4)$$

де  $H(p)$  – передавальна функція акселерометра;

$L$  – символ зворотного перетворення Лапласа - Карсона.

У другому випадку ця ж похибка

$$\Delta a_{\partial} = \frac{1}{H(0)} \int_0^t \frac{da}{d\tau} h(t-\tau) d\tau - a(t) \quad (2.5)$$

де  $h(t)$  – перехідна функція приладу.

І, нарешті, в останньому випадку

$$\Delta a_{\partial} = \frac{1}{2\pi H(0)} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega - a(t) \quad (2.6)$$

де  $H(j\omega)$  – комплексна АЧХ акселерометра;  $S(\omega)$  – комплексний спектр  $a(t)$ .

Хоча всі наведені характеристики однозначно пов'язані між собою:

$$H(j\omega) = [H(p)]_{p=j\omega} \quad (2.7)$$

$$H(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} h(t) dt \quad (2.8)$$

і принципово байдуже, яка з них повинна бути внесена в паспорт акселерометра, найбільш широко використовують сукупність амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик, оскільки сучасні технічні засоби дозволяють саме їх визначити з найбільшою точністю.

Визначена за формулою (2.5) динамічна похибка акселерометра є по суті систематичної. Однак на практиці через трудомісткість відновлення виду вхідного сигналу в більшості випадків в результат вимірювання не вносять відповідної поправки і невиключну систематичну динамічну похибку відносять до розряду випадкових. Більш того, якщо акселерометри використовують в автоматичних системах, то для внесення поправки необхідно включити в систему спеціальні коригуючі та обчислювальні пристрої, що, як правило, не представляється можливим. Тому при розробці акселерометрів прагнуть домогтися в необхідному діапазоні частот вимірюваного прискорення сталості значень АЧХ і мінімальних фазових зрушень. З розглянутими обставинами найчастіше пов'язано неправильне використання акселерометрів, коли прилади з відносно невисокою частотою власних коливань і, отже, короткою лінійної і постійною частиною АЧХ, застосовують для вимірювання більш високочастотних прискорень.

Поряд з розглянутою систематичною динамічною похибкою акселерометра в сумарну похибку результату вимірювання входить і випадкова динамічна похибка, обумовлена випадковими коливаннями параметрів приладу, його окремих ланок і елементів. Для випадку, коли вимірювальний перетворювач чи прилад описується відомим диференціальним рівнянням, коефіцієнти якого можуть бути представлені у

вигляді деяких постійних величин і їх випадкових збільшень, подібна методика наведена в роботі [31]. Однак для значної групи механічних, електромеханічних та інших перетворювачів (і в тому числі акселерометрів) пряме експериментальне визначення характеристик коефіцієнтів диференційного рівняння перетворювача надзвичайно ускладнене, а в ряді випадків є неможливим. У акселерометрів АЧХ і ФЧХ залежать від групи коефіцієнтів диференціального рівняння. При нестабільності параметрів приладу ці характеристики можуть бути представлені у вигляді суми детермінованої і деякої випадкової функції. Встановимо зв'язок між випадковою динамічною похибкою акселерометра і його АЧХ і ФЧХ.

Вихідний сигнал акселерометра  $X(t)$  представимо у вигляді

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (H_0 + \Delta H) a(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.9)$$

де  $a(j\omega)$  – перетворення Фур'є від детермінованого вхідного сигналу  $a(t)$ .

Комплексна АЧХ має вигляд

$$H(j\omega) = H_0(j\omega) + \Delta H(j\omega) \quad (2.10)$$

де  $H_0(j\omega)$  – комплексна АЧХ акселерометра для детермінованої функції;  $\Delta H(j\omega)$  – приріст комплексної АЧХ, викликане нестабільністю параметрів акселерометра.

Випадкова динамічна похибка, викликана нестабільністю параметрів, для кожної реалізації  $\Delta H(j\omega)$  становить

$$\Delta X(t) = X(t) - X_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta H(j\omega) a(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.11)$$

де

$$X_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_0(j\omega) a(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Таким чином, щоб визначити в конкретних умовах експлуатації динамічну похибку (як систематичну, так і випадкову її складові), необхідно унормувати АЧХ і ФЧХ акселерометра, а також дисперсії їх збільшень.

## 2.2 Точність оцінки спектрів прискорення, швидкості і переміщень в системах вібродіагностики машин

Машини та обладнання, що мають обертові частини, створюють механічні коливання, аналіз яких дозволяє отримати важливу інформацію про стан устаткування. Контроль стану машинного обладнання зі зміни параметрів вібрації (вібродіагностика) здійснюється шляхом аналізу і порівняння спектрів механічних коливань і дозволяє виявити зміну стану обладнання після збільшення більш ніж на 3-6 дБ рівня окремих складових спектра або смуги спектра.

Первинне перетворення вібраційного сигналу при проведенні вібродіагностики здійснюється, як правило, п'єзоелектричними датчиками прискорення (акселерометрами). Процес вимірювання супроводжується шлейфом електромагнітних завад, наведень і паразитних вібрацій (сейсмофона), обумовлених наявністю працюючого обладнання. Тому подальше перетворення сигналу з акселерометра здійснюється вимірювальними підсилювачами з перетворювачами "заряд-напруга" і з активним придушенням синфазних перешкод на вході. Необхідність застосування таких зарядових підсилювачів є особливістю систем вимірювання вібрації при проведенні вібродіагностики і вібровипробування.

Далі будемо вважати, що вимірювальна частина системи вібродіагностики забезпечує досить велике відношення "сигнал-шум", і не будемо поки розглядати питання впливу шумів вимірювального тракту і електромагнітних завад на точність оцінки спектрів за допомогою інтегрування сигналу, оцифровки і подальшого швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Під ШПФ в роботі розуміється дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) і швидкий алгоритм обчислення спектра, який вимагає, що обсяг вибірки дорівнює ступеню числа «2» [32].

Проблема інтегрування виникає, оскільки для цілей вібродіагностики в залежності від величини кутових швидкостей обертання валів використовують спектри або прискорень, або швидкостей, або переміщень. При інтегруванні сигналів постає проблема вибору:

1) інтегрувати сигнал в аналоговий спосіб, а потім оцифровувати сигнал для процедури ШПФ;

2) оцифровувати сигнал і інтегрувати його цифровим способом в ЕОМ, а потім виробляти ШПФ для отримання спектрів.

В обох випадках будемо вважати, що умови оцифровки сигналу виконуються, тобто спектр сигналу відрізняється від нуля на частотах, менших частоти  $\omega_m$ , а кругова частота дискретизації  $\omega_D > 2\omega_m$ . Зауважимо, що практично максимальну частоту спектра сигналу  $\omega_m$  визначають по зменшенню рівня сигналу менше величини кванта АЦП. Наприклад, в системі діагностики КМБ тягового залізничного складу ОМСД-02 смуга інформативного сигналу віброприскорення приблизно від 2Гц до 2кГц. Для визначення максимальної частоти сигналу на рівні 4кГц при обраної розрядності АЦП  $M=12$  необхідно мати підсилювач заряду з фільтром нижніх частот не менше п'ятого порядку і здійснювати передискретизація сигналу не менше ніж в два рази.

Оцінка спектрів прискорення, швидкості і переміщення за допомогою ДПФ здійснюється на дискретних частотах  $\omega_i = i\Delta\omega$ ,  $i = 0, 1, 2, 3 \dots N-1$  [33], де  $\Delta\omega = 2\pi/T$  – крок квантування спектра по частоті (дозвіл по частоті),  $N$  – число відліків сигналу (обсяг вибірки),  $T = \Delta t N$  – довжина реалізації (час вимірювання),  $\Delta t = 2\pi/\omega_D$  – крок квантування сигналу за часом. Для ефективного обчислення всіх компонент спектра широко використовується алгоритм обчислення ДПФ, званий ШПФ. У зв'язку з цим скрізь далі буде використовуватися термін ШПФ, а обсяг вибірки  $N$  кратний ступені числа «2» [34].

Оскільки розглядаються реальні сигнали, то вони повинні задовольняти вимогу причинної обумовленості (фізичної можливості бути реалізованим) [35].

$$A(t) = 0; \quad V(t) = 0; \quad X(t) = 0; \quad \text{при } t < 0, \quad (2.11)$$

тобто сигнал прискорення, швидкості або переміщення на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП) дорівнює нулю при  $t < 0$ .

При цьому будемо вважати, що безперервний сигнал прискорення в часовій області допускає подання до вигляду зворотного перетворення Фур'є (ПФ)

$$A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(j\omega t) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} S(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (2.12)$$

і нехай спектр прискорення  $S(\omega)$  задовольняє співвідношенню вида [9,73,75]:

$$S(\omega) = F[A(t)]; \quad S(\omega) = A_R(\omega) - jA_I(\omega);$$

$$A_I(\omega) = H[A_R(u)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A_R(u)}{\pi(\omega - u)} du, \quad (2.13)$$

де  $F[ ]$  – пряме ПФ,  $H[ ]$  – перетворення Гільберта (ПГ) [73, 75, 83],  $A_R(\omega)$  – дійсна, парна функція частоти,  $A_I(\omega)$  – дійсна, непарна функція частоти,  $\omega_m$  – верхня гранична частота спектру сигналу.

## 2.3 Системи управління процесом вимірювання та виконуючі пристрої

Розглянемо питання побудови адаптивних систем керування гармонійними вібраційними випробуваннями при випробуваннях виробів з вираженими резонансними властивостями при значному зворотньому впливі об'єкта випробувань на джерело вібрації.

### 2.3.1 Засоби забезпечення гармонійних вібраційних випробувань з розгорткою по частоті при контролі віброміцності виробів

Можна сформулювати такі основні вимоги до вібро системам для відтворення гармонійної вібрації при контролі вибропрочности виробів [36]:

- 1) Забезпечення відтворюваності результатів випробувань, що виключає неоднозначність ув'язнення.
- 2) Простота і зручність в управлінні заданим випробувальним режимом; можливість ручного і автоматичного управління.

3) Забезпечення відтворення і вимірювання параметрів вібрації в діапазоні частот 0 ... 10000 Гц, прискорень до 1000 м / с<sup>2</sup>, переміщень від 0,1 мкм до 1 м.

4) Забезпечення наступних точностей вимірювання: частоти:  $\leq 50$  Гц  $\pm (1-2)$  Гц,  $> 50$  Гц  $\pm (2-3)\%$ ; переміщення  $\pm (10-20)\%$ ; прискорення  $\pm (10-20)\%$ .

5) Забезпечення точності підтримки прискорення на вході об'єкта випробувань на рівні 0.5–2 дБ при динамічному діапазоні регулювання 10–60 дБ.

б) Допуски спотворюють факторів: нелінійні спотворення не більше 30%; рівень поперечних складових вібрації 25%; нерівномірність амплітуди коливань в точках кріплення 25%.

Окремого розгляду заслуговує питання точності електронної апаратури, задіяної в процесах вимірювання і підготовки для подальшої обробки вібраційної інформації. Як показує аналіз літератури з даного питання [36], внесок електронної апаратури в точність всієї процедури вимірювання досягає 30 – 50%. Особливого значення набуває точність первинного перетворення інформації з датчика, оскільки всі подальші етапи обробки можуть лише погіршити якість первинної вимірювальної інформації.

Сучасні засоби забезпечення гармонійного вібраційного навантаження механічних систем з розгорткою по частоті, що реалізують розглянуті вище методи і алгоритми випробувань, являють собою складні програмно-апаратні комплекси, що складаються з підсистем завдання вібраційного впливу, відтворення механічних коливань, управління навантаженням при зміні частоти, вимірювання, реєстрації та аналізу параметрів вібрації.

Основним елементом вібраційних випробувальних систем є вібратор, безпосередньо відтворює задані механічні коливання. В якості кінцевого елемента систем відтворення механічних коливань можуть використовуватися технічні перетворюючі системи різного виду [36]. Всього можна назвати вісім типів перетворювачів за принципом збудження: механічний відцентровий; механічний ексцентриковий; пневматичний; гідравлічний; п'єзоелектричний; магнітострикційний; електромагнітний; електродинамічний.

Найбільш поширені в даний час електродинамічні вібратори, принцип дії яких заснований на перетворенні в механічні коливання струму змінної частоти, що протікає по котушці, що знаходиться в постійному магнітному полі. Як задає пристрої для електродинамічних вібраторів використовуються генератори електричних сигналів. Оскільки передавальна функція вібратора залежить від частоти коливань і від приєднаної до вібратора навантаження (у вигляді об'єкта випробувань), то для реалізації будь-якого методу випробувань потрібні спеціальні способи компенсації змін передавальної функції. Електродинамічні вібратори працюють в діапазоні від 1,5 до 15000 Гц, забезпечуючи при цьому штовхає силу від одиниць Н до сотень кН [37].

Для споживача істотне значення мають такі дані вібро установок [36]:

1) Амплітудно-частотна характеристика руху платформи. Ця характеристика дозволяє зробити висновок про робочому діапазоні частот вібраційного установи, про зміну прискорення при нерегульованому по амплітуді вібраційному впливі синусоїдальної вібрацією з плавно змінною частотою.

2) Вплив випробуваного об'єкта на установку (зворотний вплив). Слід розрізняти зворотний вплив з чистим впливом маси або з явно вираженими резонансними явищами. Останній випадок є найбільш небезпечним і характерний для виробів зі зниженим запасом міцності.

3) Методи забезпечення умов випробувань. При впливі плавно змінною частотою необхідно вживати заходів до підтримання сталості заданих умов випробувань (наприклад, стабілізувати амплітуду прискорення платформи з встановленим виробом).

4) Вплив випробувальної установи на фундамент. Якщо випробувальні установки змонтовані в будівлях, то при цьому можуть виникати занадто великі динамічні навантаження, і слід вживати заходів до ізоляції випробувальних установок.

5) Граничні параметри випробувальних установок. Для оцінки можливостей випробувальної установи необхідно знати її максимально можливий або допустимий рівень впливу.

На рис. 2.1 приведена структурна схема системи випробувань метод сканування частоти [38]. Основна особливість цієї системи полягає в наявності пристрою для автоматичного проходження частотного діапазону і автоматичного регулювання заданих параметрів вібрації. Такий пристрій є невід'ємною частиною вібраційної системи, призначеної для випробувань методом розгортки частоти з використанням електродинамічного вібробудника.

Вібро системи, що реалізують метод розгортки частоти, є замкнутими системами і містять (рис. 2.1) задає блок 1, в який входять генератор, блок розгортки частоти і автоматичний регулятор рівня (АРР), підсилювач потужності 2, вібратор 3, перетворювач 4 (наприклад, п'єзоакселерометрів), підсилювач датчика вібрації 5 і прилад для вимірювання та реєстрації вібраційних параметрів 6.

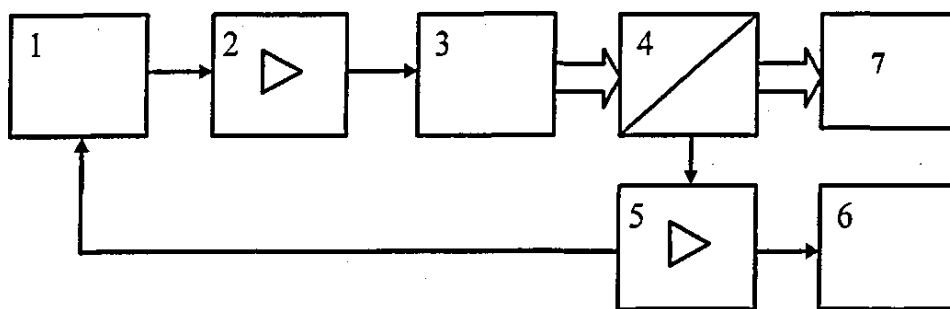


Рис. 2.1. Структурна схема системи для випробувань на гармонійну вібрацію метод сканування частоти: 1 - задає блок (джерело синусоїдальної напруги з регульованою амплітудою і перебудовується частотою); 2 - підсилювач потужності; 3 - вібратор; 4 - віброперетворювач; 5 - узгоджувальний підсилювач; 6 - вимірювальний прилад; 7 - об'єкт випробувань.

У сучасних системах вібраційних випробувань використовуються генератори з кварцовою стабілізацією частоти і електронною перебудовою частоти генерації. В автоматичних пристроях швидкість розгортки частоти змінюється за лінійним або показовому законам і може залишатися незмінною при проходженні частотного діапазону або змінюватися в залежності від АЧХ виробу. Найбільш складним і відповідальним вузлом блоку 1 є пристрій автоматичного регулювання рівня навантаження (АРР). До АРР ставляться такі вимоги: стійкість, мала інерційність, великий динамічний діапазон регулювання, мінімальні нелінійні спотворення вихідного сигналу.

Принцип роботи керуючого пристрою полягає в тому, що зміни заданого параметра на виході вібростенда викликають пропорційні зміни керуючого напруги  $i$ , отже, коефіцієнта передачі керованого каскаду і вихідного сигналу, що задає.

### **2.3.2 Моделювання та експериментальні дослідження поведінки модельного об'єкта випробувань при вібраційному навантаженні**

Модельний об'єкт випробувань являє собою балочную конструкцію (див. рис. 2.2 б), що складається з трьох горизонтальних і двох вертикальних балок, вигнутих зі смуги сплаву АМцАМ рівного перетину. На двох горизонтальних балках ближче до кінців розміщені однакові датчики прискорення (зосереджені маси  $m_1$  та  $m_2$ ), а центральна балка жорстко прикріплена до столу електромагнітного вібратора і на ній також розташований датчик прискорення (зосереджена маса  $m_3$ ), контролюючий прискорення столу вібратора.

На рис. 2.3 представлена кінематична схема об'єкта управління і вібратора.

Система рівнянь руху модельного об'єкта управління і вібратора являє собою систему рівнянь в приватних похідних, що описує ізгібніе коливання чотирьох плоских балок, .і звичайне диференціальне рівняння, що описує зворотно-поступальний рух столу вібростенда. Окремо записано рівняння для струму в обмотці збудження вібратора.

Рівняння прогину балок записані в неінерційних системах відліку, початку координат, яких пов'язані зі столом вібратора, а рівняння руху столу (переносний рух) - в інерціальній системі відліку  $XOY$ , показаної на рис. 2.3. Оскільки маса об'єкта випробувань мала в порівнянні з масою столу, а діапазон частот, в яких проводилися дослідження, лежить вище резонансної частоти столу, то можна вважати, що корпус вібратора нерухомий і з системи рівнянь (2.4), яка описує рух об'єкта управління, виключити рівняння руху корпусу вібратора.

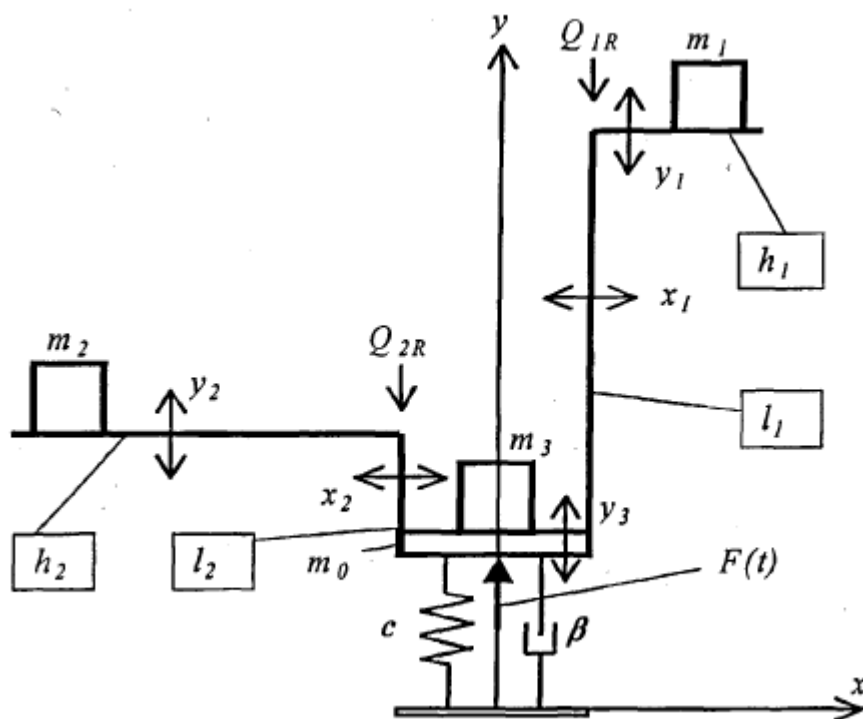


Рис. 2.3. Кінематична схема модельного об'єкта управління

## 2.4 Приводи мікропереміщення і вібратори з пружньо-деформованими актюаторами

### 2.4.1 Приводи і вібратори з пружньо-деформованим актюатором пружинного типу

В даному розділі наводиться обґрунтування методу проектування пружньо-деформованих актюаторів у вигляді двухзаходної циліндричної пружини. Даний актюатор має форму витягнутого циліндра див. рис. 2.3. Наявність двох з'єднаних заходів циліндричної пружини дозволяє замкнути електричний або магнітний ланцюг поляризації, що значно підвищує ефективність роботи актюатора. Один торець циліндра кріпиться до основи, а інший до навантаження. Торець, прикріплений до навантаження, має набір ступенів свободи, що визначається кінематикою руху навантаження.

Для розробки методу проектування необхідно розробити математичну модель роботи пружинного актюатора і провести дослідження характеристик ефекту

Відемана. Для створення моделі необхідно написати рівняння руху актюатора при різних способах його кріплення і різних навантаженнях, фізико-механічних параметрах матеріалу і найголовніше визначити параметри, що характеризують силові характеристики ефекту Відемана і їх залежність від величини осьового і циркулярного полів.

При моделюванні руху актюаторів як джерело збудження пропонується використовувати магнітопружний крутний момент  $M_w$ . Магнітопружний крутний момент  $M_w$  є силовою характеристикою ефекту Відемана і визначається експериментально-розрахунковим способом по вимірюванню кута закручування прямолінійного стержня довільного перетину.

Експериментально-розрахунковий спосіб визначення магнітопружного крутного моменту  $M_w$  полягає в наступному.

Спочатку вимірюється сімейство залежностей кута закручування  $Q_1$  вільного кінця прямолінійного стержня круглого або вибраного перерізу при заданих амплітудах змінного струму збудження від величини струму поляризації (щільності струму) в стержні. Кут закручування  $Q_1$  вимірюється методом оптичного важеля.

Далі вже по виміряній величині кута закручування обчислюється питомий кут закручення стержня  $\gamma = Q_1/L$ , де  $L$  – довжина стержня по осьовій лінії стержня.

Обертаючий момент  $M$ , прикладений до вільного кінця прямолінійного стержня довільного, квадратного, прямокутного і круглого перерізу і питомий кут закручування  $\gamma$  зв'язані співвідношенням:

$$M = \gamma A_{11}; M = \gamma 0.141a^4; M = \gamma \beta b^3 h; M = \gamma G \frac{\pi d^4}{32} \quad (2.14)$$

де  $A_{11}$  – жорсткість довільного перерізу стержня при обертанні, яка визначається геометрією перетину і модулем зсуву матеріалу стержня  $G$ ,  $a$  – сторона квадрата,  $b$  – товщина прямокутника,  $h$  – ширина прямокутника ( $h > b$ ),  $\beta$  – коефіцієнт Сен-Венана,  $d$  – діаметр круглого стержня.

Співвідношення (2.14) дозволяє нам визначити магнітопружний обертовий момент  $M_w$  за вимірюваним питомим кутом закручування  $\gamma$  і жорсткості перерізу стержня при обертанні.

Оскільки при низьких частотах струму збудження, питомий кут  $\gamma$  не залежить від геометрії перетину стержня, то, використовуючи вимірювання питомого кута для стержня круглого перетину і співвідношення (2.14), ми можемо визначити магнітопружний крутний момент  $M_w$ , що виникає в стержні довільного перетину.

Графіки залежності величини  $\gamma$  для стержня круглого перетину діаметром 4 мм виготовленого з матеріалу 49КФ (пермендюр) від щільності струму поляризації, що протікає по стержню (постійна циркулярна намагнітність) при фіксованих амплітудах струму збудження 2А і 4А (змінне аксіальне поле) наведені на рис. 2.4.

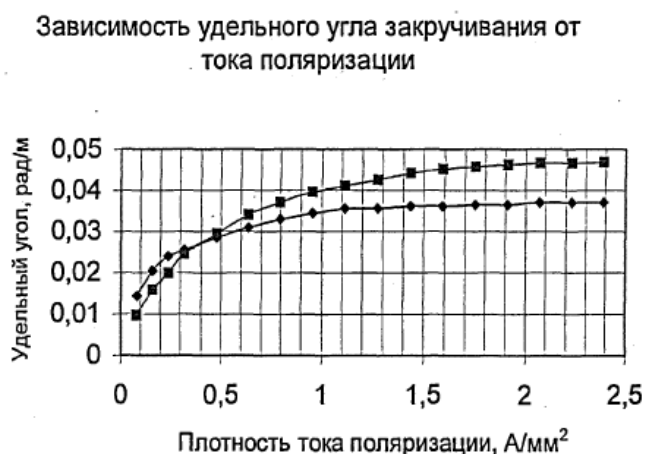


Рис. 2.4. Залежність питомого кута закручування прямолінійного стержня від струму поляризації

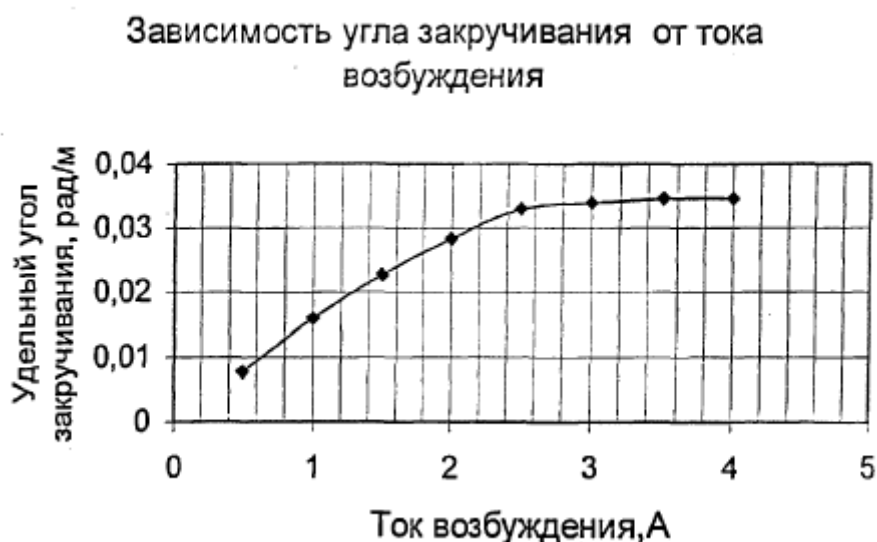


Рис. 2.5. Залежність кута закручування від струму збудження

З наведених залежностей на рис. 2.5 видно, що з ростом щільності струму поляризації, питомий кут і магнітопружний момент ростуть і досягають насичення. Тому брати великі значення струмів поляризації не вигідно, оскільки зростає перегрів стержня актюатора, що вимагає примусового охолодження приводу. Аналогічно не вигідно брати великі струми збудження, оскільки залежність питомого кута і магнітопружний моменту від струму збудження, має насичення в області великих струмів (рис. 2.5). Крім того, як це буде показано далі, при великих токах збудження величина питомої кута і магнітопружного моменту починає падати, що є особливістю роботи актюаторів на магнітопружному ефекті Відемана.

На рис. 2.5 приведена залежність питомої кута закручування від частоти струму збудження при струмі поляризації 8А.

Максимальний магнітопружний крутний момент дорівнює 0,67 Н\*м. Видно, що з ростом частоти питомий кут, а, отже, магнітопружний обертальний момент зменшується. Тому пропонується вимірювати питомий кут закручування на верхній частоті робочого діапазону приводу і використовувати при проектуванні значення магнітопружний моменту саме на цій частоті, оскільки це гарантує хід і необхідне зусилля приводу у всьому робочому діапазоні частот, наприклад, для частоти 28 Гц величина магнітопружного обертального моменту  $M_w = 0.45$  Н\*м.

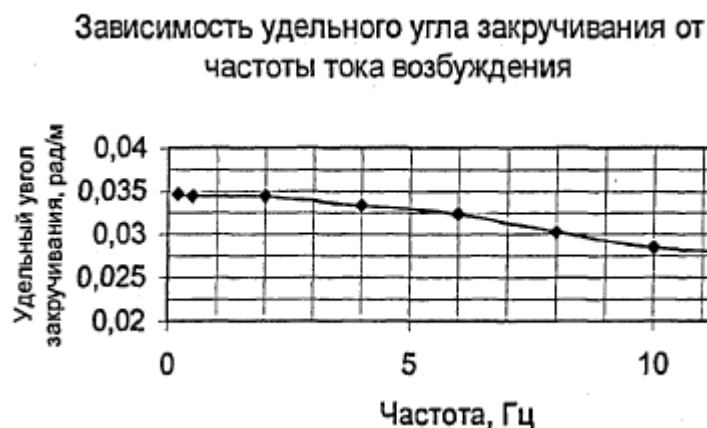


Рис. 2.6. Залежність питомого кута закручування від частоти струму збудження

Розглянемо далі актюатори у вигляді двухзаходних циліндричних гвинтових пружин. Для опису роботи актюаторів досить розглянути рух одного заходу пружини з відповідними крайовими умовами, що враховують умови кріплення актюатора до основи і навантаження, а також вплив другого заходу.

При записі системи рівнянь руху стержня використовуємо дві ортогональні системи координат: нерухому декартову систему  $(x_1, x_2, x_3)$  з одиничними векторами  $(\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3)$ , відносно якої визначають положення стержня, і рухому з одиничними векторами  $(\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3)$ , жорстко пов'язану з осьовою лінією стержня (рис. 2.6). Пов'язані (рухливі) вісі, для отримання більш простих рівнянь руху стержня, доцільно поєднати початок координат з центром тяжіння площі поперечного перерізу стержня, одну з осей, наприклад з одиничним вектором  $\bar{e}_1$  направити по дотичній до осьової лінії стержня, а дві інші – по головним центральним осям перерізу стержня. Осі, пов'язані з головними осями перерізу, назвемо головними.

Актюатори ділять на актюатори переміщення ( $\lambda > 2$ ) і акпоатори зусилля ( $\lambda < 2$ ). При постійному навантаженні актюатора  $P_{11}$  максимум корисної роботи, яку здійснюють актюатором, досягається при  $\lambda = 2$ , тобто це значення є оптимальним.

Оптимізація параметрів актюатора проводиться за допомогою цільової функції – потужності електричних втрат в ланцюзі поляризації актюатора

$$W = p_E L S j^2 = m j^2 p_E / p, \quad (2.15)$$

де  $p_E$  – питома електропровідність матеріалу спіралі,  $m$  – маса заходу пружини.

$j$  – допустима щільність струму поляризації, яка визначається за експериментальною залежністю магнітопружного моменту  $M_w$  від щільності струму поляризації і допустимому перегріву спіралі,

Оптимізація відбувається з наступними обмеженнями:

$$\begin{aligned} M_w(j)D_1(R_2, R_1, H, S) &= \delta_m = \lambda\delta_w; \\ D_2(R_2, R_1, H, S) &= F/\delta_m = P_{11}/(\lambda-1)\delta_w. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для розрахунку зусилля, ходу і власних частот і оптимізації параметрів актюаторів розроблений набір програм.

При проектуванні вібраторів існує наступна особливість, пов'язана з частотним діапазоном роботи вібратора. Якщо вібратор працює в широкому діапазоні частот, то його розрахунок аналогічний розрахунку приводу. Якщо вібратор має одну фіксовану робочу частоту, то її краще всього поєднати з резонансною частотою актюатора. Для резонансних вібраторів ми маємо значний запас по ходу і зусиллю рівний добротності актюатора в порівнянні з широкосмуговими вібраторами при однакових значеннях струму збудження, крім того, при цьому підвищується ККД. При цьому підвищується амплітуда коливань і ККД. Амплітуда ходу вібратора (гідроакустичного випромінювача) при роботі на в'язко-пружне інерційне навантаження  $\delta_w = F / \left| K_{11} + K_N + j\beta\omega_w - \omega_w^2 (M + K_{11}/\omega_p^2) \right|$ , де  $K_N$  – жорсткість кріплення переміщуваної маси (жорсткість гідроізоляції випромінювача),  $M$  – маса переміщуваного об'єкта (приєднана маса рідини,  $\omega_p$  – резонансна частота пружини,  $\omega_w$  – робоча частота приводу,  $\beta$  – коефіцієнт впливу в'язкого демпфірування, що визначає добротність резонансу.

Алгоритми чисельного розрахунку власних частот коливань криволінійних стрижнів наведені в [36] і не уявляють труднощів в програмній реалізації. Для розрахунку стартових значень резонансної частоти коливань вільної пружини в повітрі використовується формула  $\omega_p = p\sqrt{K_{11}/m}$ , де  $p$  – найменший корінь рівняння  $ptg(p) = \sqrt{m/M}$ .

Навантаженням для вібраторів служить маса, що переміщується, а для гідроакустичних випромінювачів приєднана маса рідини. Регулювання робочого ходу і зусилля вібратора, що розвивається здійснюється спільною зміною величини струму збудження і струму поляризації, оскільки найбільший хід і зусилля актюатора досягаються за однакової кількості поляризуючого і керуючого магнітних полів.

При порушенні резонансних вібраторів і гідроакустичних випромінювачів істотно витримувати оптимальне співвідношення між величинами аксіальної  $I_a$  та циркулярної  $I_u$  намагнітності  $I_a = I_u$  тобто аксіальне поле збудження повинно створювати аксіальну намагніченість не більше ніж циркулярна намагніченість поляризації, оскільки перезбудження призводить до зменшення ефективності роботи вібраторів і неоднозначності статичної характеристики приводів. Висновок даного співвідношення буде розглянуто нижче.

Наведений метод розрахунку дозволив розробити ефективні низькочастотні гідроакустичні випромінювачі в смузі частот від 0,1 Гц до 100 Гц з амплітудою коливань в повітрі до 0,01 м. Експериментально визначена в воді добротність поршневого випромінювача з циліндричної пружиною близько десяти, амплітуда коливань на резонансній частоті 28Гц порядку міліметра, а яку випромінює потужність порядку 0,05 Вт. Розміри випромінювача при цьому складають соті частки від довжини хвилі у воді.

#### **2.4.2 Приводи мікропереміщень і вібратори з пружньо-деформованими актюаторами у вигляді плоскої спіралі**

Відмінною особливістю актюаторів у вигляді плоских спіралей в порівнянні з актюатором у вигляді циліндричних пружин є термостабільність і плоска форма, що створює нові конструкторські можливості. Це обумовлено тим, що в плоских актюаторах напрямок робочого ходу перпендикулярний площині спіралі, а температурні деформації, що призводять до подовження стержня, виникають в площині спіралі і призводять лише до закручування центру спіралі. На рис. 2.7

зображений дослідний макет актюатора у вигляді плоскої двухзаходної спіралі Архімеда з обмотками і обоймою кріплення.

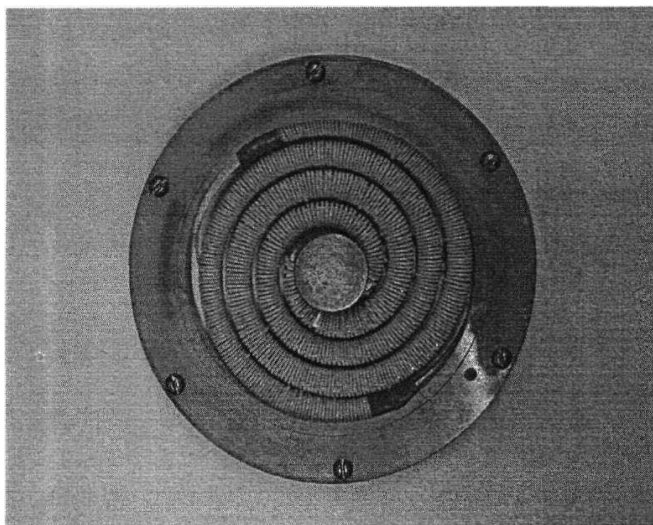


Рис. 2.7. Актюатор у вигляді плоскої спіралі Архімеда

Актюатор призначений для досліджень макетів приводів мікропереміщень з циркулярною поляризацією за допомогою струму через спіраль і управлінням приводом зміною струму через обмотки. Двухзаходна спіраль виготовлена в колі діаметром 120 мм і товщиною 4 мм методом електроіскрової обробки. Для роботи актюатора необхідно електрично і механічно розділити кінці заходів і закріпити їх в обоймі, електрично ізолювавши заходи від обойми або виконавши обойму з ізоляційного матеріалу.

На рис. 2.8 зображена конструкція приводу мікропереміщень з аксіальною поляризацією без електричних обмоток, де 1 – діелектрична обойма, 2 – двухзаходні спіралі Архімеда, 3 – постійні магніти. Аксіальна поляризація створюється двома торцевими магнітами і одним циліндровим магнітом, розташованим в центрі, а струм збудження протікає по паралельно послідовно з'єднаним заходам спіралей.

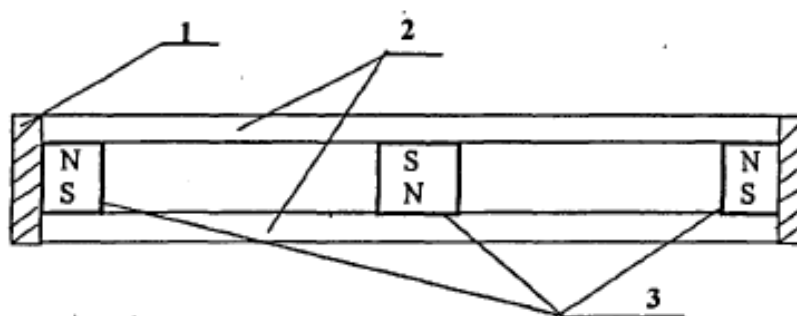


Рис. 2.8. Конструкція силового блоку приводу мікропереміщень з аксіальної поляризацією постійними магнітами.

### Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто:

- обґрунтування вибору метрологічних параметрів приладу, складаючих систему вібродіагностики і точності оцінки спектрів вібродіагностики, що реєструють при проведенні стаціонарної вібродіагностики машин.
- склад адаптивних систем управління гармонійними вібраційними випробуваннями при випробуванні виробів з вираженими резонансними властивостями при значному впливі об'єкта випробувань на джерело вібрації
- обґрунтування методу проектування пружньо-деформованих актюаторів на основі плоских пружніх елементів.

## РОЗДІЛ 3

### СИСТЕМА ПЕРЕВІРКИ СЕЙСМОДАТЧИКІВ

#### 3.1 Апаратна частина функціонування стенду

Комплекс призначений для прийому сейсмічних коливань і їх перетворення в цифровий вигляд і реєстрації (запису) з прив'язкою до єдиного часу. Станція може використовуватися для оперативної реєстрації та оцінки характеристик сейсмічних сигналів від різних джерел. Даний комплекс передбачає виконання калібрування сейсмографів і може експлуатуватися не тільки як стаціонарний пристрій, але і в польових умовах.

Основна ідея при розробці нового універсального каліброваного пристрою для перевірки працездатності і інженерного дослідження сеймоприймачів з вертикальними і горизонтальними осями чутливості пов'язана з необхідністю об'єднання як вертикальної, так і горизонтальної осі переміщення рухомої платформи пристрою в одному варіанті конструкції апаратури.

За рахунок великого розміру площадки рухомої платформи, так же передбачається, що на ній можна буде розмістити одночасно кілька сейсмометрів для одночасного тестування їх технічних станів і проведення експериментів.

На рис. 3.1 представлена конструктивна схема пристрою для перевірки вібродатчиків. Верхня (рухома) платформа умовно не показана.

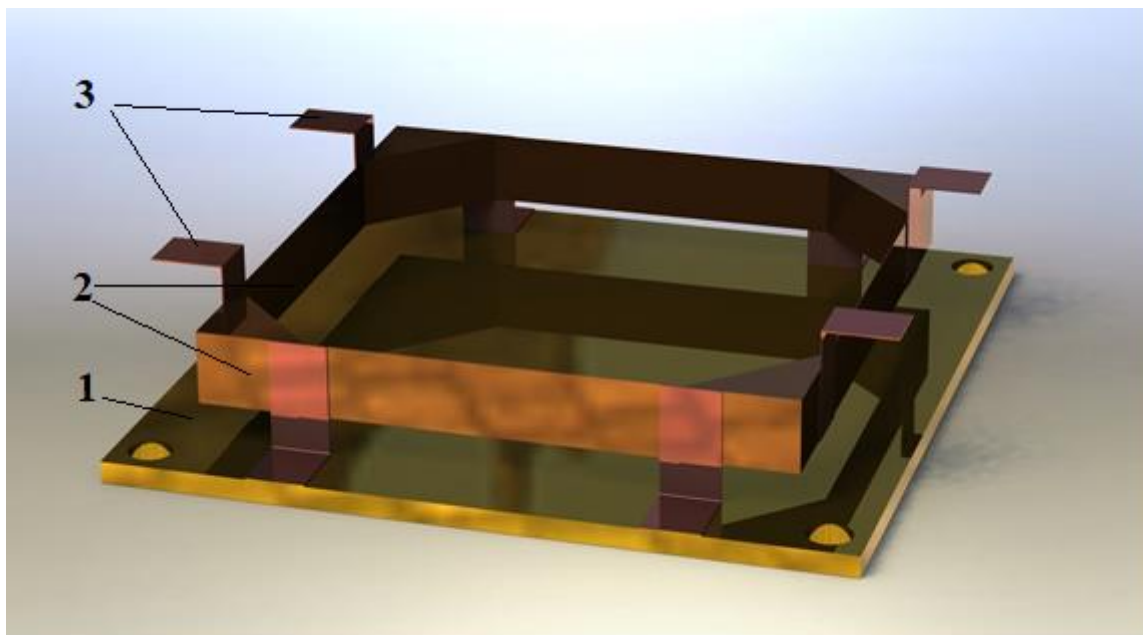


Рис. 3.1 Конструктивна схема пристрою для перевірки вібрдатчиків  
 1 – нижня (нерухома) платформа; 2 – пружні елементи підвісу; 3 – елементи кріплення плоских пружин до платформи (верхня (рухома) платформа умовно не показана).

Пристрій для перевірки технічного стану віброприймачів складається з двох модулів:

- 1) Модуль формування переміщень;
- 2) Вимірювальний модуль.

#### ***Модуль формування переміщень.***

Пристрій для перевірки технічного стану сейсмотатчиків малих переміщень розроблено для дослідження сейсмоприймачів, які мають динамічний діапазон зміщень до  $\pm 10$  мм.

Конструкція розробленого пристрою представлена на рис.3.2. а), б), в).

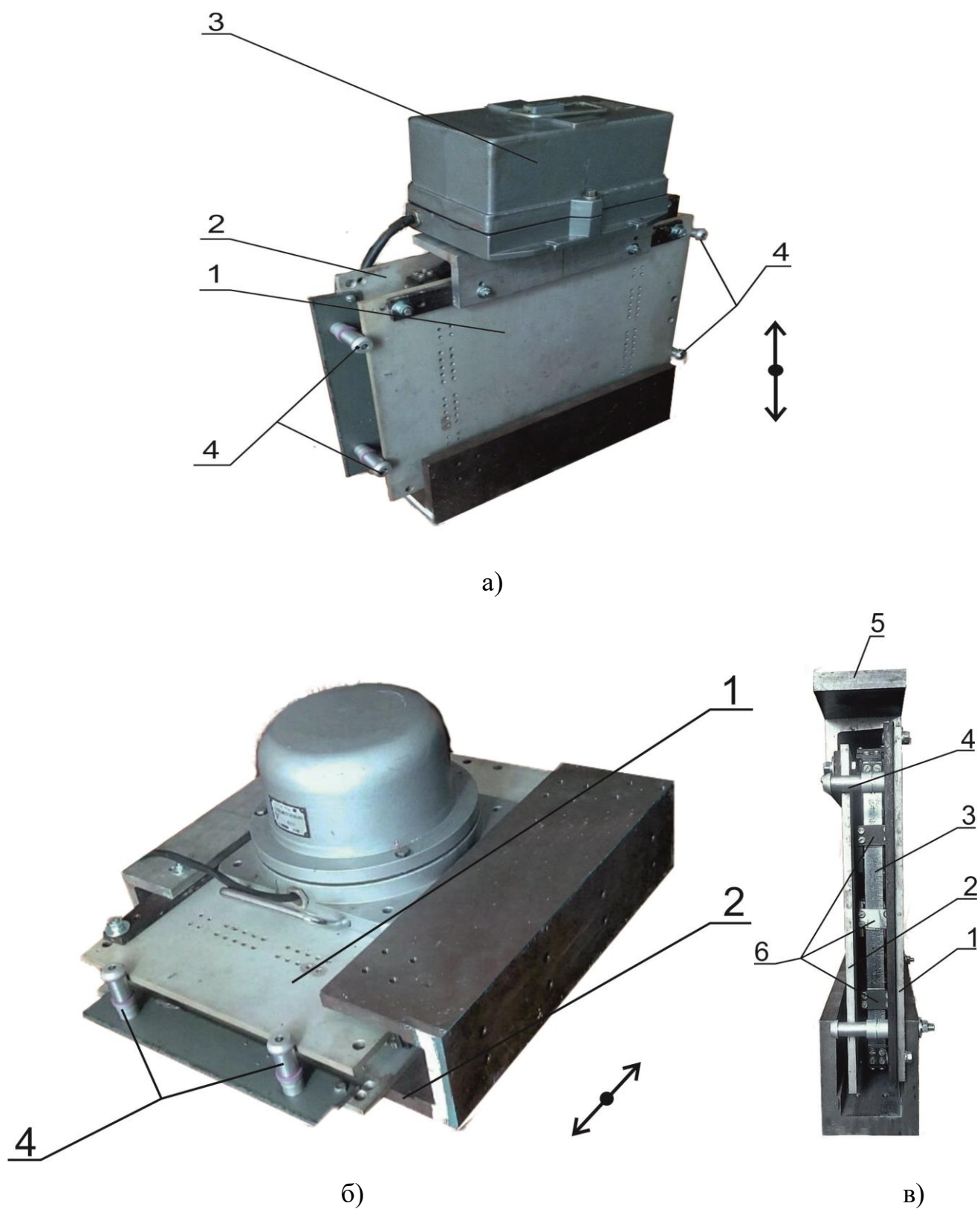


Рис. 3.2 Пристрій для перевірки технічного стану сейсмодатчиків малих переміщень: а) у положенні дослідження вертикальних коливань;

б) у положенні дослідження горизонтальних коливань;

в) конструкція пружних елементів підвісу.

Основні елементи пристрою – 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.

Передбачена зміна власної частоти коливань пристрою. Регулювання частоти досягається двома методами:

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

Таке регулювання дає змогу змінювати власну частоту коливань рухомої платформи в межах 0,1 – 10 Гц.

Маса датчика з додатковими вантажами – до 15 кг.

Енергетична автономність стенду досягається за рахунок використання акумуляторних двигунів. В конструкції використовується акумуляторний шуруповерт. Механізм перетворення обертального руху у постапальний створено на основі кулісного механізму, який складається з кривошипу 2, кулісного камня 7 і куліси 8.

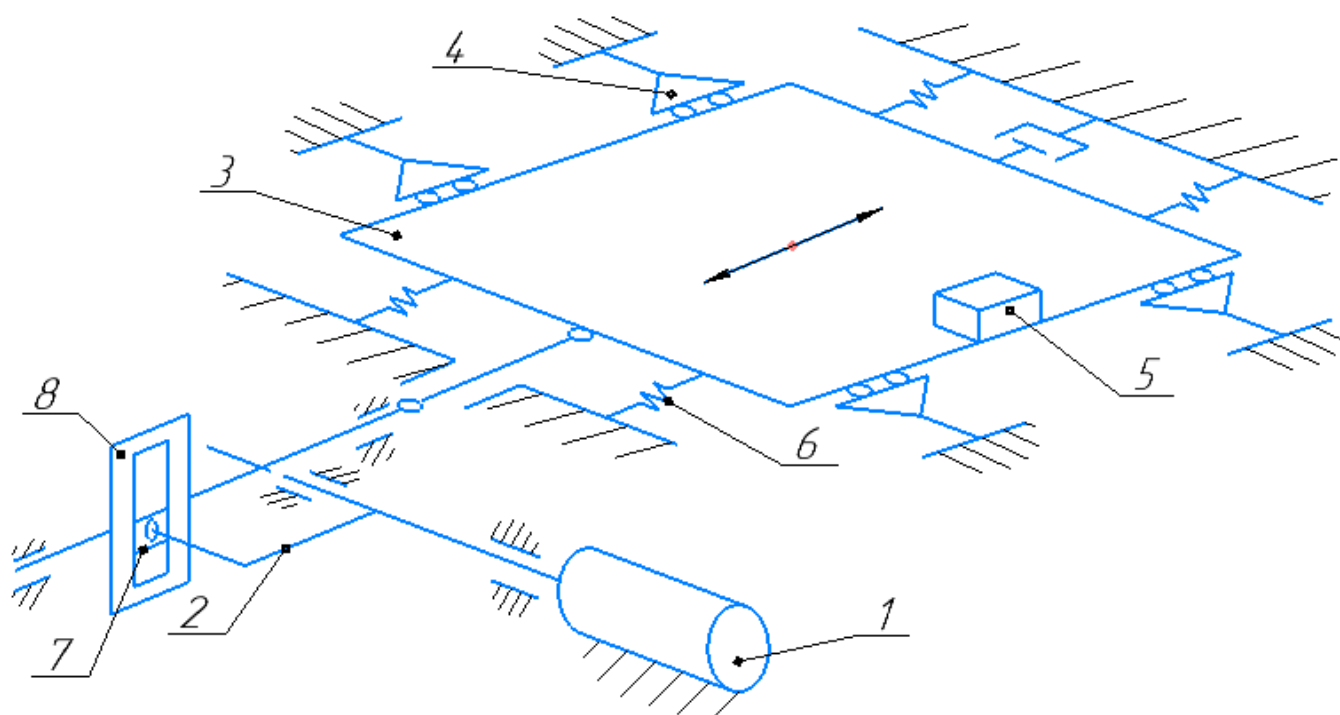


Рис. 3.3 Кинематична схема станда

### ***Вимірювальний модуль***

Акселерометр ADXL335 в даному випадку працює як датчик для вимірювання вібрацій. Пристрій здатний реєструвати вібрації по трьом осям (X, Y і Z), що робить його більш універсальним. ADXL335 генерує аналогову напругу, еквівалентну прискоренню, що генерується при дії вібрації. Виходи X, Y і Z підключені до контактів АЦП плати Arduino Nano.

Модуль акселерометрів ADXL335 представлений на малюнку 3.4.

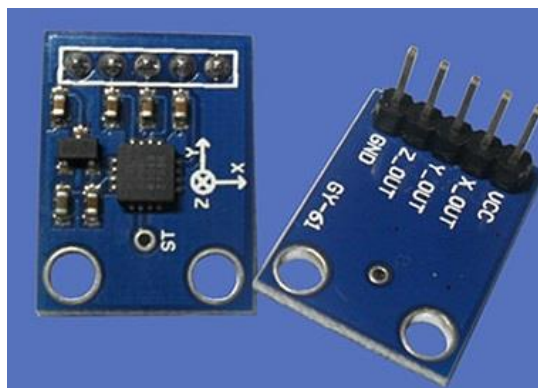


Рис. 3.4 – Акселерометр ADXL335

Нагадаємо що, акселерометр - пристрій для вимірювання прискорення як динамічного так і статичного.

З динамічним прискоренням має бути все зрозуміло - штовхнули датчик, надали йому прискорення, він повинен це зафіксувати. Статична прискорення - це вплив сили тяжіння на наш датчик. Справа в тому, що до датчика навіть в стані повного спокою докладено прискорення рівне  $g$  (прискорення вільного падіння).

Датчик ADXL335 вимірює обидва ці прискорення. А це значить, що знаючи проекції його вектора, при потребі можна спокійно знайти кут на який відхилився наш датчик щодо деякого нульового значення.

Якщо розташувати датчик контактами вниз, то значення по осі  $Z$  буде дорівнювати одиниці (точніше одному  $g$ ). Дане значення, як було сказано - проекція вектора статичного прискорення на вісь нашого датчика. Так як в даному випадку вектор збігається з віссю  $Z$ , а прискорення вільного падіння дорівнює  $g$ , ми і маємо значення  $Z_{out} = 1g$ . Якщо ж ми перевернемо датчик контактами вгору, то значення  $Z_{out}$  зміниться на протилежне  $Z_{out} = -1g$ .

Варто відзначити, що всі інші прискорення дорівнюють нулю, пов'язано це з вже згаданим збігом вектора статичного прискорення з віссю  $Z$ , а так же станом спокою всього датчика. Аналогічно можна розглянути всі інші пари. Єдина відмінність в тому, що датчик буде знаходитися на ребрі або боці.

Однак вектор далеко не завжди буде збігатися з будь-якої з осей. Найчастіше цей вектор буде якимось розподілений по всіх трьох осях - тому що простір тривимірне.

Перш за все при виборі датчика, треба розуміти, що акселерометри бувають з цифровими і аналоговими інтерфейсами. Перші хороші тим, що менше схильні до перешкод і дозволяють підключати до єдиної шини безліч периферійних

пристроїв - явна економія пінів контролера. Мінус, проте в тому, що для роботи з такою периферією потрібно в коді реалізувати протокол обміну, а це витрата іншого цінного ресурсу - пам'яті.

Акселерометр ADXL335 є 3-х осьовим, аналоговим і для отримання інформації з нього необхідно використовувати більше пінів ніж з цифрового.

Розглянемо схему підключення. Чіп аналогового акселерометра ADXL335 досить невеликий і поміщений в BGA корпус, і в домашніх умовах його складно змонтувати на плату. Тому в використанні береться готовий модуль GY-61 з акселерометром ADXL335.

Для харчування акселерометра необхідно подати на вивод VCC модуля напруга +3,3 В. Вимірювальні канали датчика підключаються до аналогових виводів Arduino "A0", "A1" і "A2".

### 3.2 Програмна частина функціонування стенду

#### *Калібрування вимірювачів*

Задачею калібрування акселерометра є визначення параметрів моделі їх вихідних сигналів з метою їх подальшого урахування при обчисленні дійсного значення проєкцій  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  уявного прискорення на осі вимірювального модуля. Калібрування низькочастотних лінійних акселерометрів виконується на спеціальних стендах шляхом завдання тестових вхідних впливів (прискорень) і вимірюванням вихідних сигналів акселерометра. Калібрування акселерометрів в діапазоні  $\pm 1g$  ( $\pm 9,8 м/с^2$ ) здійснюється шляхом завдання відомих положень акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння  $g$ .

Для точного завдання положення акселерометра відносно вектора сили тяжіння  $g$ , частіше за все використовують прецизійні оптичні ділильні головки (ОДГ), що забезпечують точність повороту акселерометра на рівні приблизно 5-10 кутових секунд.

Вимірювальний модуль повинен мати щонайменше дві перпендикулярні базові поверхні, які і формують базові осі приладу. Вимірювальний модуль встановлюється однією зі своїх баз на площадку ОДГ і притискається другою базою до однієї з осей вимірювального модуля відносно осі обертання ОДГ.

Для здійснення калібрування вісь обертання ОДГ і базова платформа виставляються в горизонті. Це дозволяє з високою точністю зорієнтувати базові осі

вимірювального модуля, а значить, і акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння  $g$ .

Розглянемо один з найпоширеніших варіантів задання положення акселерометра при калібруванні на ОДГ. Для повного калібрування акселерометра, його необхідно обертати навколо двох осей. Справа у тому, що для визначення параметрів моделі вихідних сигналів акселерометрів необхідно задавати відомі положення по кожній з трьох осей X, Y, Z, а це означає, що кожна з трьох осей повинна змінювати своє положення відносно вектора  $g$ .

При повороті акселерометра на ОДГ навколо однієї осі, ця вісь не змінює своє положення відносно вектора  $g$ . Тому акселерометр переставляють на ОДГ, змінюючи вісь обертання.

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювань, вихідний сигнал акселерометра було осереднено на протязі часу вимірювання 30с.

Після калібрування на ОДГ розраховуємо отримані параметри через середовище MatLab.

### ***Прошивка датчика вимірювального модуля***

Завантажуємо скетч в пам'ять Arduino для зчитування з аналогових входів показання за трьома каналам з подальшим виведення їх в послідовний порт.

Arduino має 10-розрядний АЦП, а максимальне допустиме напруження на виведення – 3,3 В. Виміряні напруги кодуються бітами, які можуть приймати тільки 2 значення - 0 або 1. Це означає, що весь діапазон вимірювань буде поділений на 1024 рівних відрізка.

Для того щоб перевести зняті показання в вольти, потрібно кожне виміряне на аналоговому вході значення поділити на 1024 (відрізка), а потім помножити на 5 (В)

Калібрування було проведено на поворотному столі

### 3.3 Методика перевірки працездатності сейсмоприймачів

Метою перевірки працездатності сейсмоприймачів малих переміщень є перевірка функціонування його основної вимірювальної частини та виявлення можливих технічних та функціональних порушень в роботі датчиків. Для перевірки використовується вібраційний метод, що полягає у збуренні коливань і подальшому аналізі вібраційних відгуків (згасаючих вихідних сигналів вимірювального каналу сейсмоприймача) на ці збурення.

Конструкція пристрою (рис.3.2) забезпечує тестове первинне зміщення рухомої пластини відносно нерухомої на величину до 15 мм, як при горизонтальних так і вертикальних коливаннях. Величина первинного зміщення може бути змінена за допомогою регулюючого гвинта і вимірюється по переміщенню рухомого індексу відносно нерухомої шкали інструментальної лінійки.

Рухома платформа пристрою разом із закріпленим на ній досліджуваным приладом після відхилення її і відпускання здійснює неперервні згасаючі коливання в горизонтальній або (в залежності від розташування) вертикальній площині.

Методика випробувань:

1. Встановити досліджуваний сейсмоприймач на рухомій платформі пристрою.
2. З'єднати кабель вихідного вимірювального каналу приймача зі входом аналого-цифрового перетворювача системи реєстрації і збереження інформації (або з осцилографом 8 на рис. 1.9)
3. Відхилити рухому платформу на величину тестового зміщення 15 мм та відпустити.
4. Зареєструвати вихідний сигнал сейсмоприймача в системі реєстрації відповідно до розробленої методики.
5. Повторити випробування (пункт 3 та пункт 4) 3 або 5 разів.

Методика забезпечує :

- перевірку працездатності приладу та виявлення можливих явних технічних порушень в роботі сейсмоприймача;
- візуальне спостереження та оцінювання на екрані осцилографа:
  - величин вихідного сигналу сейсмоприймача;
  - характеру загасання сигналу сейсмоприймача;
  - власну і вимушену частоти коливань в системі датчик – об'єкт;
  - інтенсивність шуму у вихідному сигналі;
- реєстрацію, збереження та первинну обробку вихідних сигналів у розробленій системі реєстрації та збереження інформації.

Дослідження доцільно проводити при різних частотах вібраційного збурення, зміна частоти вібраційного збурення здійснюється за допомогою встановлення додаткових вантажів.

### 3.5 Результати досліджень

В розділі представлені основні результати перевірки стенду при дії як вертикальної так і горизонтальної вібрації. Вихідними параметрами, які вимірювались були віброприскорення, віброшвидкість та вібропереміщення.

**Віброприскорення** – це значення вібрації, прямо пов'язане з силою, що викликає вібрацію. Віброприскорення характеризує ту силову динамічну взаємодію елементів всередині агрегату, яке викликало дану вібрацію. Зазвичай відображається амплітудою (Пік) – максимальне по модулю значення прискорення в сигналі. Застосування віброприскорення теоретично ідеально, так як п'езодатчик (акселерометр) вимірює саме прискорення і його не потрібно спеціально перетворювати. Недоліком є те, що для нього немає практичних розробок по нормам і граничним рівням, немає загальноприйнятого фізичного і спектрального тлумачення особливостей прояву віброприскорення. Успішно застосовується при діагностиці дефектів, що мають ударну природу – в підшипниках кочення, редукторах.

**Віброшвидкість** - це швидкість переміщення контрольованої точки обладнання під час її прецесії уздовж осі виміру.

На практиці вимірюється зазвичай не максимальне значення віброшвидкості, а її середньоквадратичне значення, СКЗ (RMS). Фізична суть параметра СКЗ віброшвидкості полягає в рівності енергетичного впливу на опори машини реального вібраційного сигналу і фіктивного постійного, чисельно рівного за величиною СКЗ. Використання значення СКЗ зумовлено ще й тим, що раніше вимірювання вібрації велися стрілочними приладами, а вони все за принципом дії є інтегруючими, і показують саме середньоквадратичне значення змінного сигналу.

З двох широко застосовуваних на практиці уявлень вібросигналів (віброшвидкість і вібропереміщення) краще використовувати віброшвидкість, так як цей параметр відразу враховує і переміщення контрольованої точки і енергетичний вплив на опори від сил, що викликали вібрацію. Інформативність

вібропереміщення може зрівнятися з інформативністю віброшвидкості тільки за умови, коли додатково, крім розмаху коливань, будуть враховані частоти, як все коливання, так і його окремих складових. На практиці зробити це досить важко.

Для вимірювання СКЗ віброшвидкості використовуються найпростіші прилади - віброметри. У більш складних приладах (віброаналізатор) також завжди присутня режим віброметра.

**Вібропереміщення** (віброзміщення, зміщення) показує максимальні межі переміщення контрольованої точки в процесі вібрації. Зазвичай відображається розмахом (подвійною амплітудою, Пік-Пік, Peak to peak). Вібропереміщення – це відстань між крайніми точками переміщення елемента обертового обладнання уздовж осі виміру.

На рисунках 3.6 – 3.8 представлені результати дослідження вібраційного стенду при дії горизонтальної вібрації для трьох частот коливання стенду. Амплітуда віброзміщення в цих дослідах була постійна і складала 5,5 мм.

Інші значення характеристики вібрації були автоматично розраховані і представлені на графіках

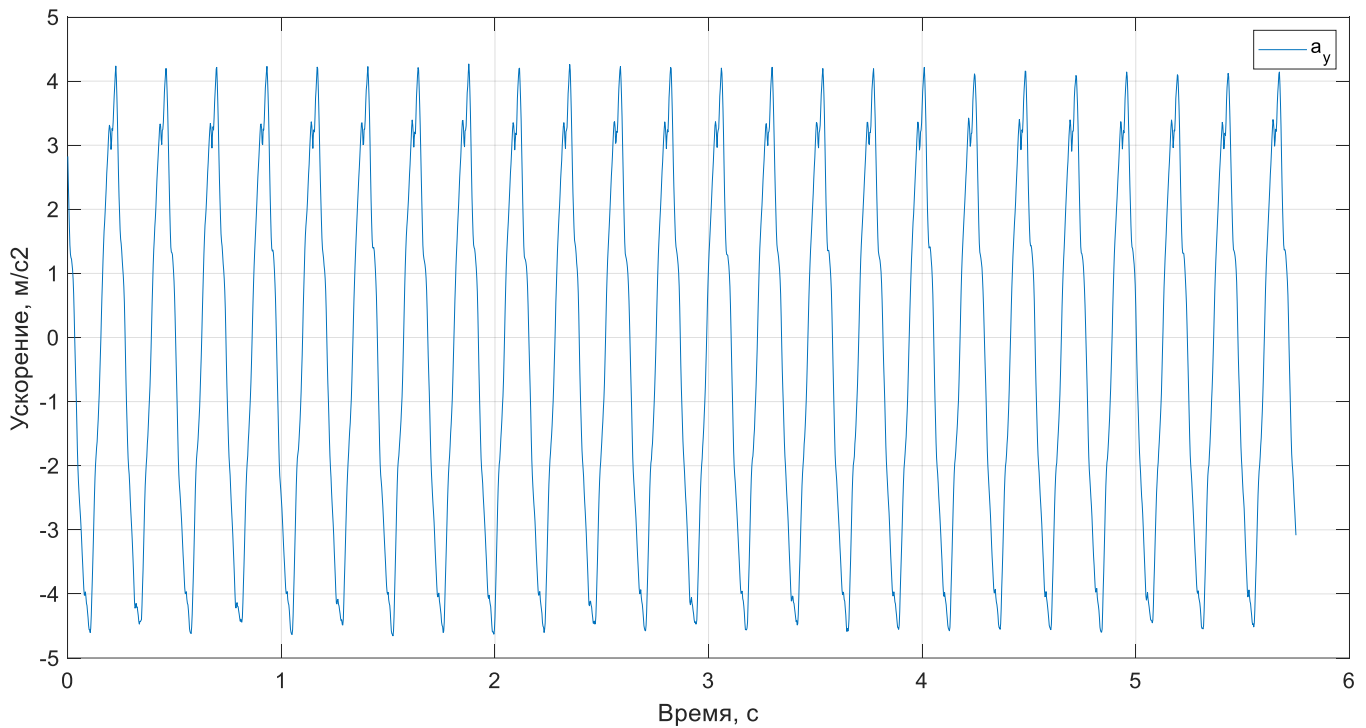


Рис. 3.6 Віброприскорення по координаті Y при низьких частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.235 \text{ с}$$

$$f = 1/T = 1/0.235 = 4.255 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.235 = 26.667 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 26.667 = 0.14667 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 26.667^2 = 3.91 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

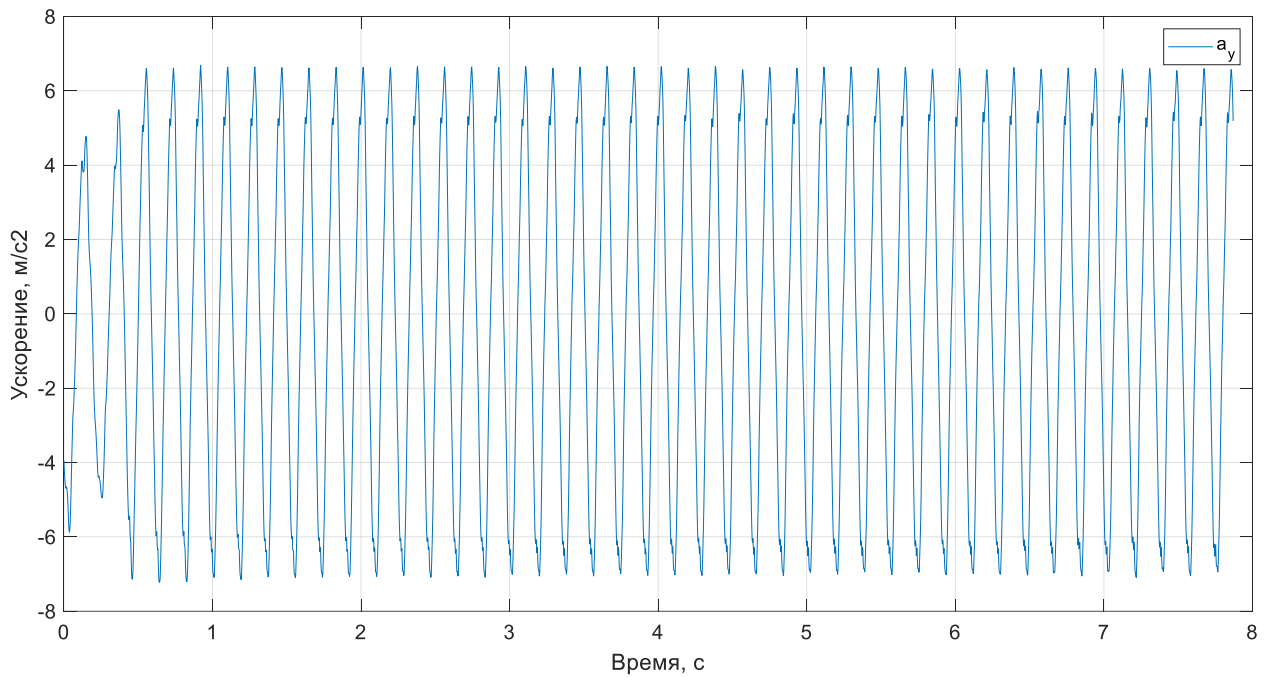


Рис. 3.7 Віброприскорення по координаті Y при середніх частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.18 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.18 = 34.889 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 34.889 = 0.19189 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 34.889^2 = 6.69485 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

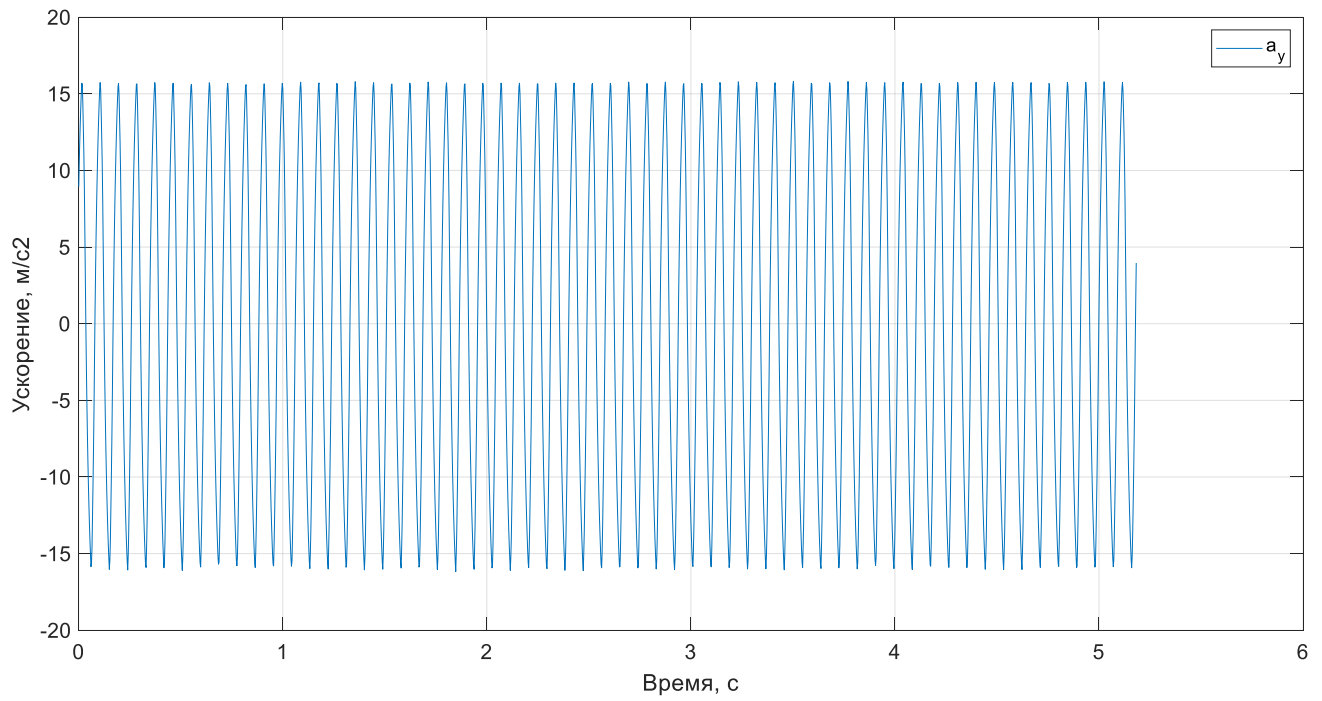


Рис. 3.8 Віброприскорення по координаті Y при високих частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.087 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.087 = 72.184 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 72.184 = 0.397 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 72.184^2 = 28.658 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

На рисунках 3.9 – 3.11 представлені результати вимірювання віброприскорення стенду при дії вертикальної вібрації. Амплітуда вібропереміщення складала 5.5 мм. Інші значення характеристики вібрації були автоматично розраховані і представлені на графіках

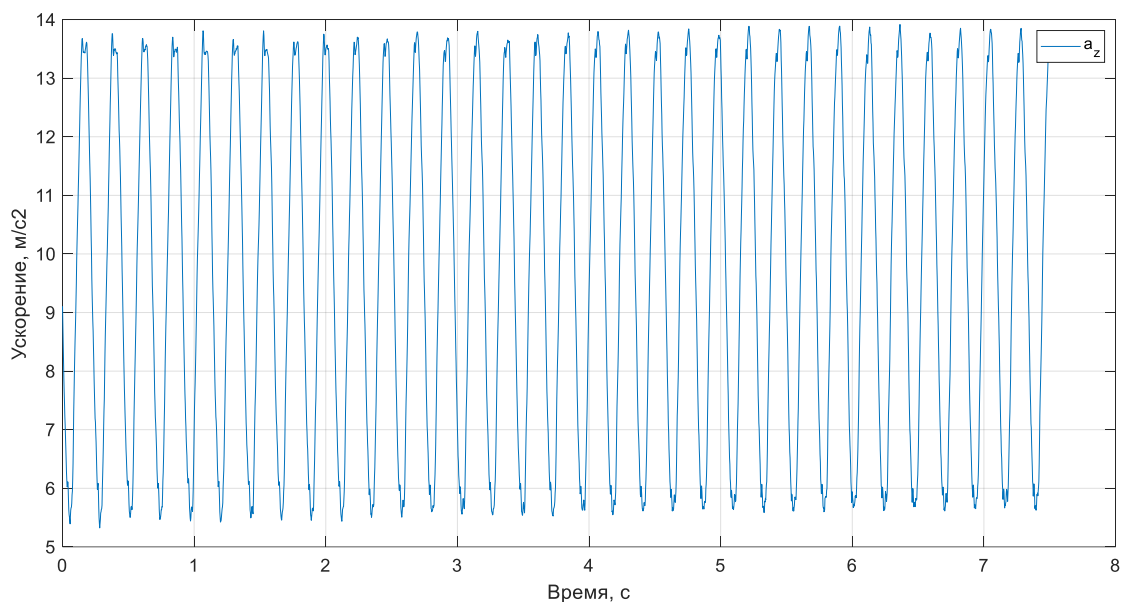


Рис. 3.9 Віброприскорення по координаті Z при низьких частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.235 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.235 = 26.723 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 26.723 = 0.147 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 26.723^2 = 3.927 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

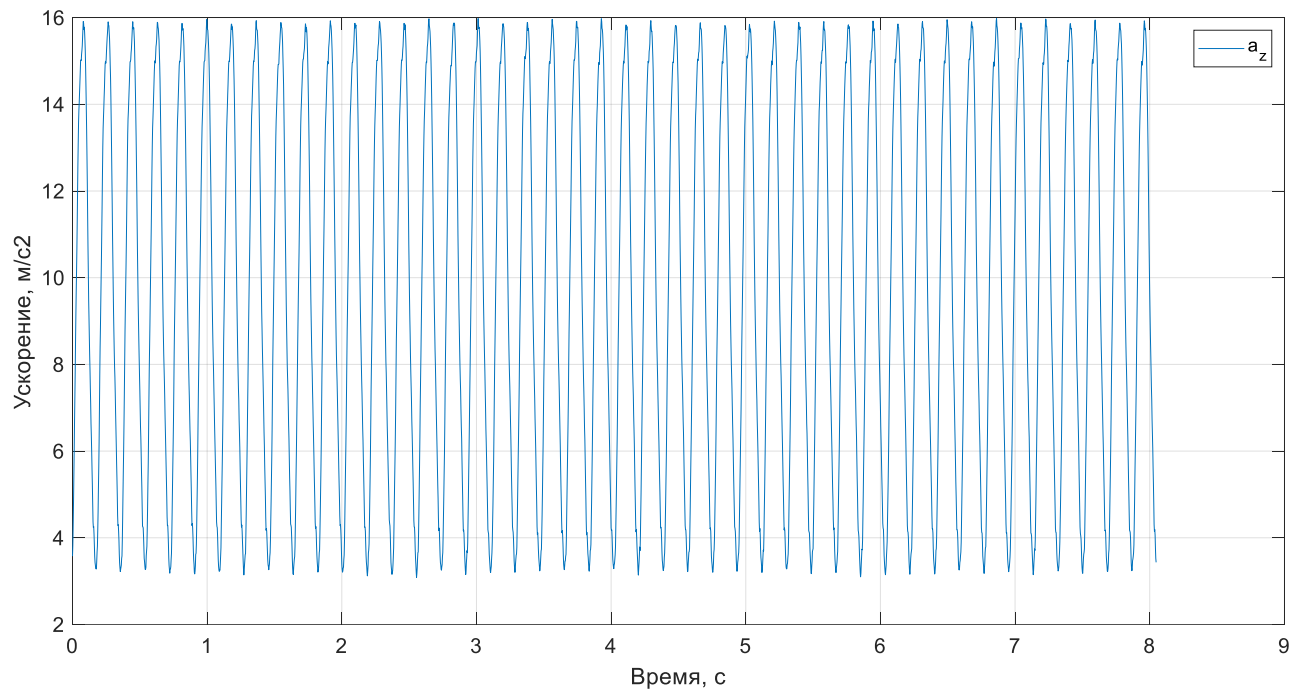


Рис. 3.10 Віброприскорення по координаті Z при середніх частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.185 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.185 = 33.946 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 33.946 = 0.1867 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 33.946^2 = 6.3378 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

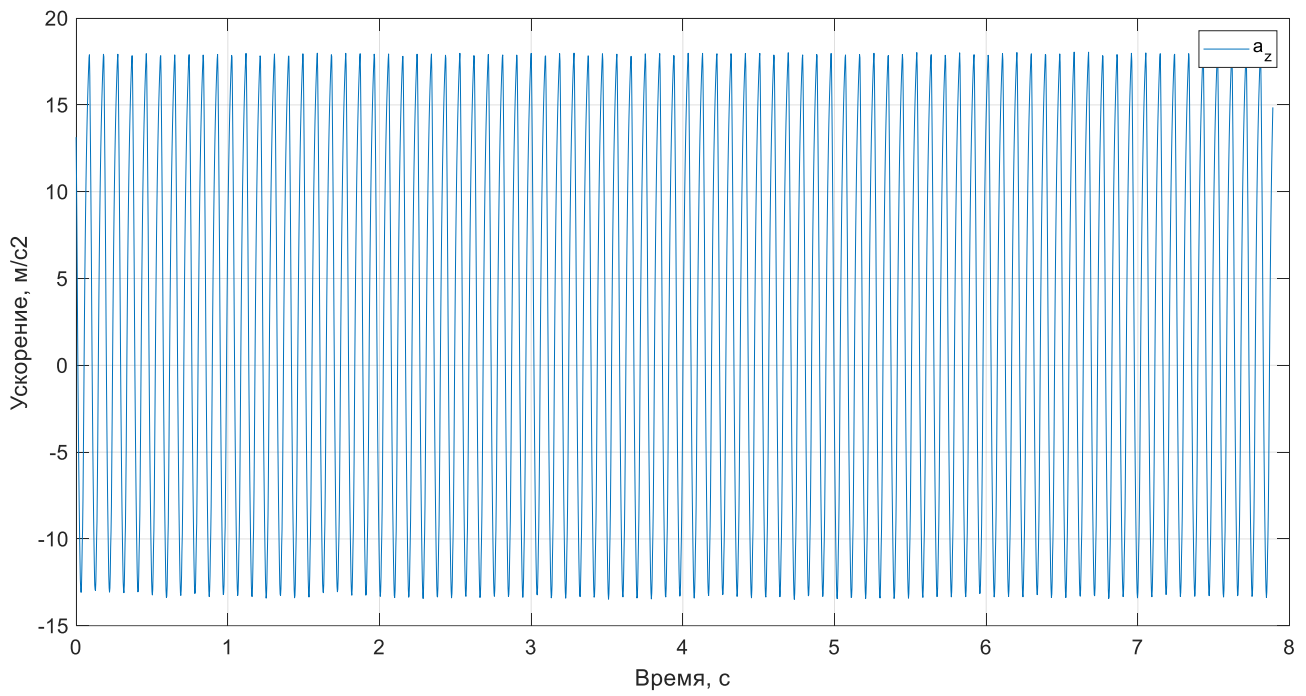


Рис. 3.11 Віброприскорення по координаті Z при високих частотах

$$A = 5.5 \text{ мм} = 0.0055 \text{ м}$$

$$T = 0.095 \text{ с}$$

$$\omega = 2\pi / T = 6.28 / 0.095 = 66.105 \text{ рад / с}$$

$$A \cdot \omega = 0.0055 \cdot 66.105 = 0.364 \text{ (м / с)}$$

$$A \cdot \omega^2 = 0.0055 \cdot 66.105^2 = 24.034 \text{ (м / с}^2\text{)}$$

На основі проведеного дослідження можна сформулювати основні технічні характеристики стенду

### **Технічні характеристики мобільного автономного низькочастотного вібростенда**

Частотний діапазон	0,2 – 10 Гц
Максимальна амплітуда віброзміщення	15 мм
Максимальне (амплітудне) віброприскорення на опорній частоті 7 Гц (маса датчика, що досліджується 100г.)	30 м/с <sup>2</sup>
Максимальна (амплітудна) віброшвидкість на опорній частоті 7 Гц (маса датчика, що досліджується 100г.)	0,7 м/с
Максимальна маса калібруємого датчика	10 кг
Режими роботи	горизонтальний вертикальний
Необхідно автономний (акумуляторний) привод з регулюванням обертів з частотою обертання обертальним моментом	0 - 10 Гц 25 Нм
Маса вібростенда	22 кг
Габаритні розміри, мм	500X500X300

#### ***Висновки до розділу***

1. На високих частотах коливань (від 7 до 10 Гц) спостерігається розходження вимірювальних показів значень амплітуди віброприскорення з розрахунковими даними. Основе припущення цього факту те, що амплітуда коливань не витримується в сталому значенні (5,5 мм), а зменшується в зв'язку з досить великою інерційністю рухомого робочого стола. При модернізації стенду конструкцію робочого стола потрібно замінити
2. Для підвищення точності вібростенду необхідно також доповнити його схему датчиком лінійних переміщень (оптичним, лазерним або на основі вихрових струмів).

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВІБРАЦІЙНИЙ СТЕНД ТА МОДУЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ»

#### 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.

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.

*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.

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 проект	Конкурент 1. Мобільний вібростенд VCB-131 Ex	Конкурент 2 SEV 180 з підсилювачем DSA4	Конкурент 3. Вібростенд з збільшеним розмахом вібропереміщення, ЕМІС			
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	150x200x100мм	240x235x290мм	725x500x795 мм	300x250x210 мм			+

5	Маса стенду	25 кг	13 кг	850кг	120кг		+	
6	Динамічний діапазон зміщень	До $\pm 15$ мм	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 розмішувати 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	Посадження 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	Наявна	Доступна

	горизонтальною осями чутливості.	прецизійні шарикопідшипники.		
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 наукових міжнародних проектах	Проходження наукової сертифікації	Наявна	Доступна
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 Електроніка. Ракето– та авіапромисловості	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

**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	Різне 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 ВСВ-131 Ех	Вібростенд з збільшеним розмахом вібропереміщення, 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, проект 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 проектів 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 конкурентоспроможності. 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 стартан-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

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*
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційованого 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*
	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 сформувати 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)
	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 відносно 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
	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
	Продаж	Повний супровід товару до замовника, його встановлення та налаштування	Канал нульового рівня	Безпосередній (прямий)
	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	Високо-швидкісна 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

У відповідності з вимогами до випробувальних вібраційних стендів були успішно розв'язані наступні задачі:

- розроблено та виготовлено мобільний автономний стенд для вібровипробувань низькочастотних датчиків
- проведено натурні випробування стенду при вертикальних та горизонтальних режимах вимірювання вібрації

Представлений вимірювальний стенд забезпечує:

- частотний діапазон – 0,2-10Гц
- максимальна амплітуда віброзміщення – 15мм
- максимальне віброприскорення –  $30\text{м/с}^2$
- маса вібростенду 22кг.

Представлені рекомендації подальшої модернізації стенду

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] – Carter, R. Weighted Least-Squares Based Control for a Four Axis Gimbal Set / R. Carter, P. Duffey, S. Bachorski, M. Kagi, H. Havlicsek // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7663. – P. 1–12.
- [2] – Герман-Галкин, С. Г. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
- [3] – Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д. М. Калихман; под общ. ред. акад. В. Г. Пешехонова – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электробор», 2008. – 296 с.
- [4] – Плотников, Д. А. Повышение точности интеллектуального датчика вибрации / Д. А. Плотников // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (г.Новочеркасск, 30 нояб. 2010г.) / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 19-22.
- [5] – Пат. 99158 РФ, МПК G01H17/00. Устройство дистанционного измерения коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра / Лачин В.И., Малина А.К., Плотников Д.А. – № 2010125245/28; заявл. 18.06.10; опубл. 10.11.10, Бюл. №31. – 2 с.
- [6] – Плотников, Д. А. Контроллер интеллектуального датчика вибрации / Д. А. Плотников, А. К. Малина, К. В. Кравченко // Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – С. 36-39.
- [7] – Лачин, В.И. Многоуровневая распределенная система мониторинга вибрационного состояния и защиты турбоагрегатов / В. И. Лачин, А. К. Малина, Д.А. Плотников // Информационные технологии и управление: юбилейн. сб. науч. тр. фак. информ. технологий и упр. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: Ред. журн. «Изв. вузов. Электромеханика», 2001. – С. 69-74.

- [8] – «Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям» Марк Серридж, Торбен Р. Лихт
- [9] – ГОСТ Р 8.669-2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. МП»
- [9] – «Аналоговые датчики расстояния». Brian Duval. Перевод: Алексей Журав.  
[//www.sensor.ru/articles/299/element\\_300.html](http://www.sensor.ru/articles/299/element_300.html)
- [10] – «Виброизмерительная аппаратура». Каталог ООО «ГлобалТест»2005
- [11] – «Руководство оператора ZETLab», ООО «ЭТМС».
- [12] – Заболотских В.И., Копытов А.Г. Портативная информационно- измерительная система для регистрации ударных процессов. //ПСУ, N 5, 2000, С. 64-67.
- [13] – Шкаликов В.С. и др. Измерение параметров вибрации и удара. М.: Изд-во стандартов, 1980. - 280 с.
- [14] – Деньков С.В. Восстановление сигналов по результатам динамических измерений цифровыми регистраторами// Автометрия. - том 41, N5,2005. С-51-57.
- [15] – Thorhauge Andersen., Jacobsen Niels-Jorgen. New technology increases the dynamic ranges of data acquisition system based on 24-bit technology, Sound and Vibration, N.4, pp. 8-11.
- [16] – Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения- Л.: Энергоатомиздат, 1984.-224с.
- [17] – Субботин М.И. Особенности измерения виброускорения при выделении части широкополосного процесса // Измерительная техника, 2003, N1.-С. 39-40.
- [18] – Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. М: Физматлит. 2002. - 384с.
- [19] – Субботин М.И. Диагностирование пьезоэлектрических датчиков по форме затухающих резонансных колебаний // Измерительная техника, 2001, N3.- С.46-47.
- [20] – Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006 - 856 с.
- [21] – Ваньков Ю.В. Низкочастотные методы контроля. Метод свободных колебаний. Казань. Издательство КГЭУ, 2003.- 140с.
- [22] – Леньков С.В., Молин С.М., Кензин С.С. Адаптивный алгоритм управления гармоническими испытаниями изделий аэрокосмической техники // Техника машиностроения - 2001, №5.- С. 129-131.

[23] – Леньков С.В. Моделирование динамики системы управления и процесса измерения при гармонических вибрационных испытаниях резонансных конструкций с малым разрешенным запасом прочности

//Вестник ИжГТУ.-2004.-Ы4.-с. 10-13.

[24] – Леньков С.В. Приводы микроперемещений и вибраторы с упругодеформируемыми актюаторами в виде плоской спирали на магнитоупругом эффекте Видемана. //Сб. статей «Магнитные явления», вып. 1, Ижевск, 2004.-С. 166-175.

[25] – Леньков С.В. Измерение амплитуд гармоник напряжения сети с помощью быстрого преобразования Фурье и контроль несинусоидальности напряжения методом сигнатурного спектрального анализа. Научно-технический форум с международным участием «Высокие технологии - 2004». Материалы научно-технической конференции «Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение», Ижевск, 2004.- С. 72-76.

[26] – Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006 - 856 с.

[27] – Деньков С.В. Восстановление сигналов по результатам динамических измерений цифровыми регистраторами// Автометрия. - том 41, N5,2005. С-51-57.

[28] – Деньков С.В. Измерение амплитуд гармоник периодического сигнала с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье при оценке несинусоидальности напряжения сети// Вестник ИжГТУ, N3, Ижевск, ИжГТУ, 2005. С-34-36.

[29] – Кузьмин Э.Н. Обеспечение виброударостойкости оборудования и аппаратуры. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИИТФ, 2003- 320с.

[30] – Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов / Кузовков Б. Н., Совмен В. К., Эквист Б.В., Варганов В.Г. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 180 с.

[31] – Разработка стендовой аппаратуры для испытания бесплатформенного инерциального блока в условиях углового движения: отчет о НИР (заключ.): № госрегистрации 01201366262 / Рук. В. В. Седышев; исполн. А. Н. Лысов [и др.] – Челябинск. 2014. – 91 с.

[32] – «Аналоговые датчики расстояния». Brian Duval. Перевод: Алексей Журав.

//[www.sensor.ru/articles/299/element\\_300.html](http://www.sensor.ru/articles/299/element_300.html)

[33] – «Виброизмерительная аппаратура». Каталог ООО «ГлобалТест»2005

[34] – «Руководство оператора ZETLab», ООО «ЭТМС».

[35] – Пат. 99158 РФ, МПК G01H17/00. Устройство дистанционного измерения коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра / Лачин В.И., Малина А.К., Плотников Д.А. – № 2010125245/28; заявл. 18.06.10; опубл. 10.11.10, Бюл. №31. – 2 с.