

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

**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра приладів та систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021\_р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно інтегровані технології та систем навігації і керування»**

**Спеціальність «151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»**

**на тему: «Низькочастотний акселерометр»**

Виконав :

студент IV курсу, групи ПГ – п81

Погребняк Юрій Петрович \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент кафедри ПСОН , к.т.н., доцент

Мироненко Павло Степанович \_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент, к.т.н., доцент

Нечай Сергій Олексійович \_\_\_\_\_

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

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

### ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення            | Найменування                 | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|-----------------------|------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                       | Завдання на дипломний проєкт | 2                |          |
| 2     | A4     | ДП 07 1730. 00.001 ПЗ | Пояснювальна записка         | 52               |          |
| 3     | A1     | ДП. 07 1730 01.000 КС | Кінематична схема            | 1                |          |
| 4     | A1     | ДП. 07 1730 02.000 СК | Складальне креслення         | 1                |          |
| 5     | A1     | ДП. 07 1730 03.001    | Робоче креслення             | 1                |          |
| 6     | A1     | ДП. 07 1730 04.002    | Робоче креслення             | 1                |          |
| 7     | A1     | ДП. 07 1730 05.003    | Робоче креслення             | 1                |          |
| 8     | A1     | ДП. 07 1730 06.004    | Робоче креслення             | 1                |          |
| 9     | A1     | ДП. 07 1730 07.005    | Робоче креслення             | 1                |          |
|       |        |                       |                              |                  |          |
|       |        |                       |                              |                  |          |

|           |           |       |      |                                 |                                                         |        |
|-----------|-----------|-------|------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|
|           |           |       |      |                                 |                                                         |        |
|           | ПІБ       | Підп. | Дата |                                 |                                                         |        |
| Розробн.  | Погребняк |       |      | Відомість<br>дипломного проєкту | Лист                                                    | Листів |
| Керівн.   | Мироненко |       |      |                                 | 1                                                       | 1      |
| Консульт. |           |       |      |                                 | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>Каф. ПСОН<br>Гр. ПГ-п81 |        |
| Н/контр.  |           |       |      |                                 |                                                         |        |
| Зав.каф.  |           |       |      |                                 |                                                         |        |

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

Освітньо-професійна програма Комп'ютерно інтегровані технології та системи навігації і керування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія Бурау

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Погребняку Юрію Петровичу**

1. Тема проєкту « Низькочастотний акселерометр»

керівник проєкту Мироненко Павло Степанович, к.т.н., доцент, затверджені  
наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2021р

3. Вихідні дані до проєкту: Маятниковий компенсаційний акселерометр. Діапазон вимірювання прискорень  $\pm 15g$ ; границя чутливості –  $10^{-5} g$ , похибка вимірювання – 0,5 %, вага 50Н, температурний діапазон –  $50 \dots +50^{\circ} C$ , наявність системи самоконтролю.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд схем лінійних акселерометрів. Математична модель акселерометра. Розрахунок конструктивних параметрів. Розробка конструкції приладу. Опис принципу роботи . Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників ,плакатів, презентацій тощо): кінематична схема, складальне креслення, робочі креслення деталей. Ілюстративний матеріал.

6. Консультанти розділів проєкту\*

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

7. Дата видачі завдання 08.03.2021 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту        | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1.    | Огляд схем акселерометрів                        | 30.04.2021                      |          |
| 2     | Опис та розрахунок основних елементі конструкції | 21.05.2021                      |          |
| 3.    | Конструювання ММГ та створення 3D-моделей        | 28.05.2021                      |          |
| 4.    | Виконання креслеників                            | 04.06.2021                      |          |
| 5.    | Оформлення пояснювальної записки проєкту         | 09. 06. 2021                    |          |

Студент

Юрій ПОГРЕБНЯК

Керівник

Павло МИРОНЕНКО

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Низькочастотний акселерометр»**

Київ – 2021 року

## Зміст

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Всуп.....                                                                         | 8;  |
| Розділ 1 Огляд конструкцій лінійних акселерометрів.....                           | 10; |
| 1 Основні відомості про лінійний акселерометр.....                                | 10; |
| 1.1 Одновісний акселерометр прямого вимірювання .....                             | 11; |
| 1.2 Мікромеханічні осьові акселерометри.....                                      | 22; |
| 1.3 Мікромеханічний нахиломір.....                                                | 24; |
| 1.4 Акселерометр фірми Texas Instruments Inc.....                                 | 27; |
| 1.5 Акселерометр фірми Cornell Research Foundation Inc.....                       | 28; |
| 1.6 Модифікований акселерометр.....                                               | 29; |
| Розділ 2 Проектування низькочастотного акселерометра.....                         | 31; |
| 2.1 Розробка структурної схеми приладу.....                                       | 31; |
| 2.2 Розрахунок підвісу чутливого елемента.....                                    | 33; |
| 2.3 Розрахунок мембрани .....                                                     | 36; |
| 2.4 Розрахунок магнітоелектричних систем перетворювачів струм – переміщення ..... | 38; |
| 2.5 Розрахунок магнітоелектричного датчика сили.....                              | 42; |
| 2.6.Опис роботи акселерометра.....                                                | 44; |
| 2.7 Опис системи самоконтролю.....                                                | 45; |
| Висновки:.....                                                                    | 48; |
| Список використаної літератури .....                                              | 49; |
| Додатки .....                                                                     | 50; |

## **Анотація**

В даному дипломному проекті розглянуто питання проектування низькочастотного лінійного акселерометра з системою самоконтроля.

Представлено огляд конструкцій осьових акселерометрів та типів самоконтроля для подібних систем. В спроектованому акселерометрі функція самоконтроля вирішує дві задачі.

По- перше , користувач може перевірити, що акселерометр готовий до роботи, тобто інерційна маса виконує вимірювальне переміщення.

По – друге, прикладена сила магнітоелектричного перетворювача дозволяє регулювати переміщення інерційної маси, тобто проводити налаштування датчика.

Спроможність до самоконтроля підвищує надійність датчика, так як забезпечує контроль магнітного потоку в чутливому елементі , і сили, що відхиляє інерційну масу.

Наявність системи самоконтроля суттєва спрощує схеми налаштування та управління датчика.

## Summary

In this diploma project the issue of designing a low-frequency linear accelerometer with a self-monitoring system is considered.

An overview of the designs of axial accelerometers and types of self-monitoring for such systems. In the designed accelerometer, the self-monitoring function solves two problems.

First, the user can check that the accelerometer is ready for operation, ie the inertial mass can move. Secondly, the applied force of the magnetoelectric transducer allows to regulate the movement of the inertial mass.

The ability to self-control increases the reliability of the sensor, as it provides control of the magnetic environment that surrounds the sensitive element, and the force that deflects the inertial mass.

The ability to self-control significantly reduces the sensor control circuit.

## Вступ

Акселерометром це прилад, функціональне призначення якого полягає у вимірюванні кутових або лінійних прискорень . Акселерометр вимірює уявне прискорення , що діє на вимірювальний перетворювач в проекції на вісь чутливості пристрою.

Також акселерометрами вважаються пристрої, призначені для вимірювання уявної швидкості , що представляє собою інтеграл від уявного прискорення[4]. Саме тому такі акселерометри прийнято іменувати інтегруючими. Також до акселерометрів можна віднести і вимірювачі прискорень лінійних вібрацій (віброакселерометри).

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ЛІНІЙНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

#### 1.1 Основні відомості про лінійні акселерометри

По типу чуттєвого елемента акселерометри можуть бути поділені на гіроскопічні та негіроскопічні . Також до різних категорій відносять лінійні та маятникові акселерометри . А за принципом вимірювання ці прилади можна поділити на компенсаційні та акселерометри прямого вимірювання .

Чутливим елементом акселерометра зазвичай виступає інерційна маса , яка напряду сприймає та реагує на дію прискорення . В залежності від типу акселерометра чутливою масою може виступити як гіроскоп ( в гіроскопічних акселерометрах ) , так і тверде тіло відповідної маси та форми (в негіроскопічному типі акселерометрів). В авіаційних системах зазвичай використовують саме чутливі елементи у вигляді твердого тіла .

За допомогою акселерометра можна вирішити широкий спектр задач . І при цьому акселерометри класичного типу найчастіше використовуються в пілотажно - навігаційних системах літаків .

Приклади питань , що можуть бути вирішені за допомогою цього вимірювача:

- видача сигналів попередження при досягненні літаком небезпечних значень прискорення;
- подача сигналів відключення корекції гіродвигунів , при досягненні літальним апаратом заданого прискорення;
- формування сигналів зворотнього зв'язку в системах автоматичного керування траєкторією польоту ;
- видача сигналів в інерційну навігаційну систему

Для закріплення інерційної маси в корпусі датчика можуть використовуватись різноманітні типи підвісів, зокрема :

- пружинні і торсіонні;
- на шарикопідшипникових опорах;
- на розтяжках ;
- гідростатичні типи підвісів;
- газостатичні типи підвісів;
- електростатичні підвіси;
- електромагнітні типи підвісів.

Поєднання функціональних частин , що входять в склад акселерометра, можуть утворювати як замкнену так і розімкнену системи . Акселерометри також можна поділити по принципу кількості складових прискорення , які ці пристрої можуть вимірювати .

За цим принципом поділу акселерометри бувають :

- одновісні ( однокомпонентні );
- двовісні (двокомпонентні );
- тривісні (трикомпонентні ).

Як зрозуміло з назви , однокомпонентні пристрої мають одну вісь чутливості , та вимірюють одну складову прискорення . Двокомпонентні вимірюють дві складові та мають дві осі чутливості . Аналогічно трикомпонентні відповідно мають три осі вимірювання. .

## **1.2 Одновісний акселерометр прямого вимірювання**

Розглянути роботу механічного акселерометра більш детально ми зможемо на прикладі одновісного акселерометра прямого вимірювання з пружним підвісом сейсмічної маси.

Кінематична схема даного пристрою приведена на рис.1:

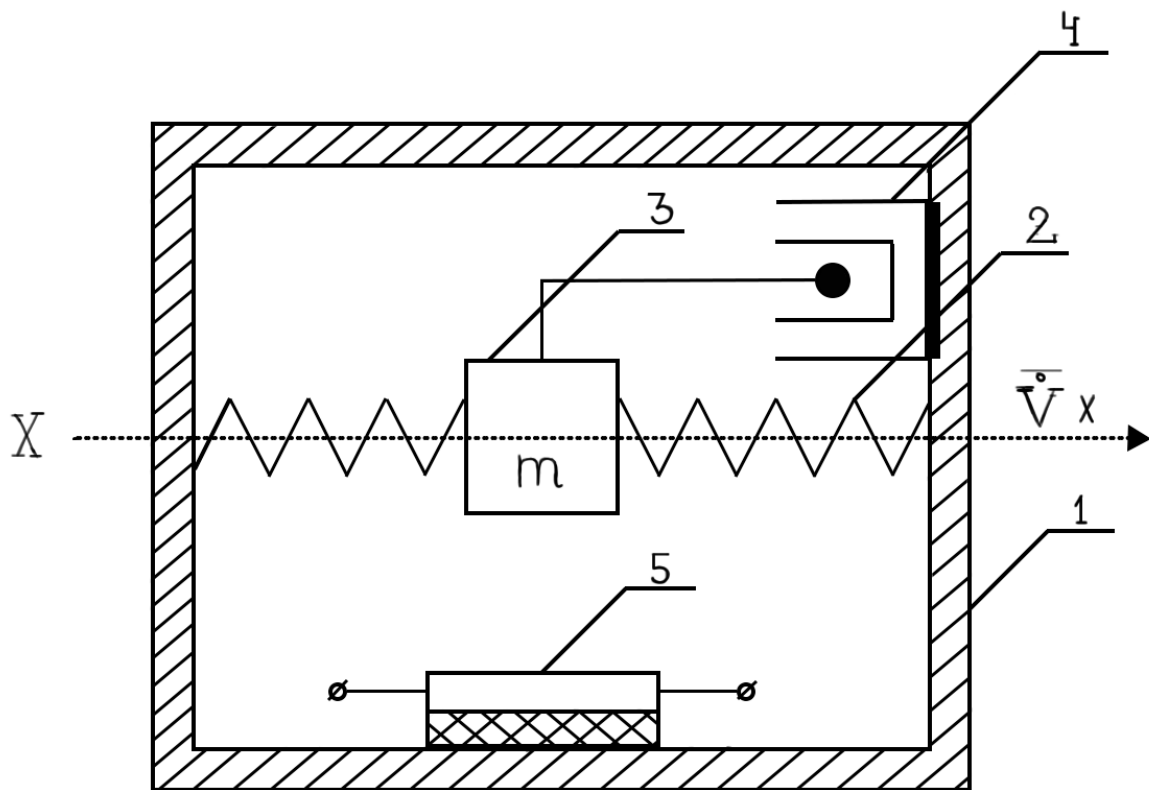


Рис 1 . Датчик лінійних прискорень

1. Корпус
2. Пружини підвісу
3. Інерційна маса
4. Повітряний демпфер
5. Потенціометричний перетворювач

Як це добре видно з рисунку 1 чутливий елемент 3 підвішений на пружинах 2 у корпусі прибору 1 . Для гасіння власних коливань в конструкції передбачена наявність повітряного демпферу 4 . Вихідний сигнал, пропорційний вимірюваному прискоренню, знімається з потенціометричного перетворювача 5 [2]. Віссю чутливості даного акселерометр являється вісь OX .

У випадку використання даного приладу на літальному апараті вісь чутливості встановлюється паралельно осі ЛА, відносно якої проводимуться виміри .

Принцип дії акселерометра заснований на вимірі сили інерції, що діє на сейсмічну масу при її русі з прискоренням. Розглянемо сили, що прикладені до сейсмічної маси при русі середовища вимірювання з прискоренням. В цілях спрощення, моделі напрямлення прискорення ЛА по відношенні до осі чутливості виберемо довільним. Переміщення чутливого елемента по відношенню до основи позначимо через  $x$ .

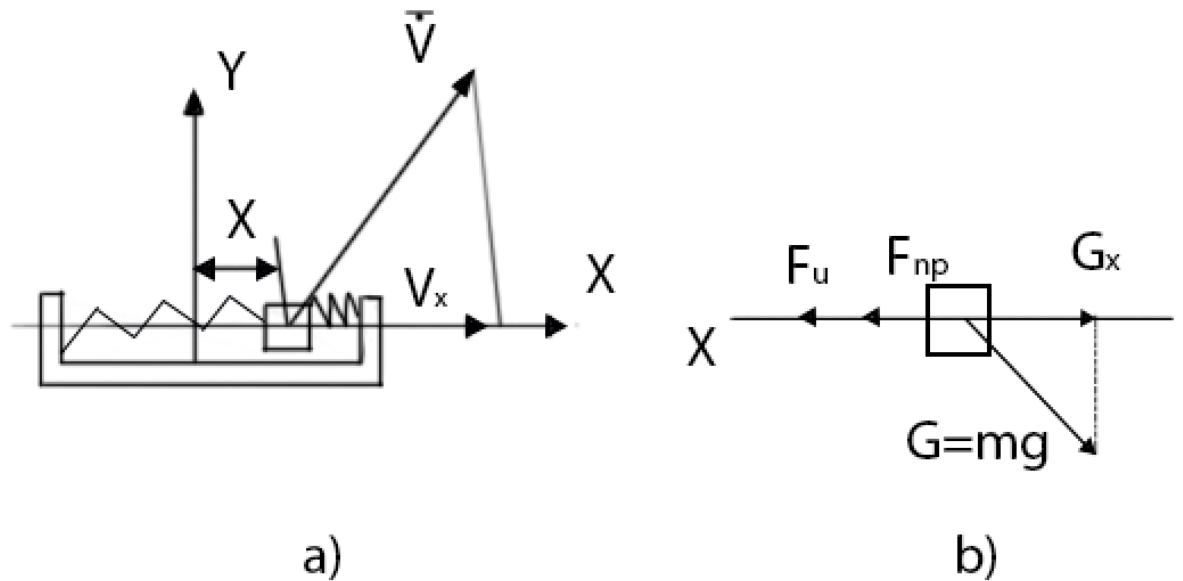


Рис.2. Принцип роботи акселерометра лінійних прискорень

Припустимо, що рухоме тіло здійснює рух з постійним прискоренням  $\dot{V}$ . Проекцію даного прискорення на ось  $X$  представимо у вигляді  $\dot{V}_x$ .

При русі об'єкту з прискоренням  $\dot{V}_x$  до чутливого елемента будуть прикладені сили:

$F_u$  – сила інерції, що є добуток маси чутливого елемента на прискорення  $\dot{V}_x$

$$F_u = m\dot{V}_x.$$

$F_y$  – пружна сила деформації пружини

$$F_y = K_y X$$

де  $K_y$ - коефіцієнт пружності.

$G_x$  – складова сили тяжіння вздовж осі чутливості

$$G_x = mg_x .$$

Врахуємо напрямлення , та знайдемо суму цих сил в проекції на вісь чутливості акселерометра

$$-m\ddot{V}_x - K_y X + mg_x = 0 \quad (1.1)$$

Тоді переміщення чутливого елемента

$$X = -\frac{m}{K_y} \left( \ddot{V}_x - g_x \right) \quad (1.2)$$

В даному виразі величина  $(\ddot{V}_x - g_x)$  іменується уявним прискоренням. .

Визначаємо уявне прискорення через  $\ddot{V}_{kx}$  [3].Велечина , що визначає відношення маси чутливого елемента до коефіцієнту пружності підвісу , є чутливість датчика  $h_{\text{ЧЄ}}$  . Таким чином верхній вираз можна записати наступним чином :

$$X = -h_{\text{ЧЄ}} \ddot{V}_{kx} , \quad (1.3)$$

де  $h_{\text{ЧЄ}} = m/K_y$  - чутливість акселерометра.

В даному виразі від’ємний знак характеризує рух ЧЄ як протилежний напрямку дії прискорення . Від’ємний знак в даному випадку не здійснює ніякого впливу на характеристики датчика і його прийнято ігнорувати .

З рівняння динаміки акселерометра можна дослідити поведінку інерційної маси в перехідних режимах , тобто в таких, де на ЧЄ додатково діє інерційна сила

$$F_u = m \ddot{x} , \quad (1.4)$$

а також сила демпфірування

$$F_d = K_d \dot{x} \quad (1.5)$$

де  $K_d$ - коефіцієнт демпфірування.

Якщо врахувати сили, представлені в вище приведених виразах , ми маємо можливість представити рівняння динаміки наступним чином :

$$m \ddot{x} + K_d \dot{x} + K_y x = m \dot{V}_{kx} \quad (1.6)$$

Дане рівняння являється основним рівнянням динаміки акселерометра лінійних прискорень з поступальним переміщенням інерційної маси . При наявності в системі сил сухого тертя , в праву частину рівняння додається  $F_{mp}$  і рівняння (1.6) отримає вид :

$$m \ddot{x} + K_d \dot{x} + K_y x = m \dot{V}_{kx} - F_{mp} \quad (1.7)$$

Якщо поставити ціллю вивчення роботи датчика з точки зору динаміки , то зазвичай використовується дане рівняння у вигляді :

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m} \quad (1.8)$$

Де  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_y}{m}}$  - частота власних недемпфованих коливань інерційної маси

$$2\xi\omega_0 = \frac{K_d}{m}$$

$\xi$ - ступінь затухання власних коливань ЧЄ.

Рівняння динаміки представимо в статичному вигляді . При цьому

$\ddot{x} = \dot{x} = 0$  . А також прирівнюємо до нуля коефіцієнт тертя  $F_{mp}=0$  .

Таким чином отримаємо :

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx}$$

Звідси чутливість датчика :

$$h_{qC} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (1.9)$$

При такій форми запису чутливості видно , що чутливість датчика знаходиться в прямій залежності від частоти власних недемпфованих коливань інерційної маси на пружному підвісі. Так як  $\omega_0$  в 8-10 разів має перевищувати значення частоти зміни прискорення вимірюваного середовища то це призводить до такої проблеми як крайня складність проектування акселерометрів, що мають вимірювати високочастотне прискорення. Також таке фізичне явище як тертя в осях підвісу інерційної маси призводить до виникнення порогу чутливості .

Для того щоб отримати вираження даного параметру пристрою запишемо рівняння статичного вигляду :

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m}$$

Звідки при  $x=0$  отримаємо

$$\dot{V}_{kx} \min \geq \frac{F_{mp}}{m} \quad (1.10)$$

При дослідженні систем управління елементи , що включені в її структуру, можуть бути представлені у вигляді передаточних функцій . Для отримання такої функції акселерометра приймемо  $F_{mp} = 0$  а також застосуємо перетворення Лапласа до обох частин рівняння( 1.6)

$$S^2 x(s) + 2\xi\omega_0 s x(s) + \omega_0^2 x(s) = \dot{V}_{kx}(s) \quad (1.11)$$

З даного рівняння можемо вивести вираз для передаточної функції акселерометра :

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{h_{\text{чс}}}{T^2 S^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (1.12)$$

Як слідує з вище приведеного виразу, акселерометр з точки зору динамічних властивостей по своїй суті представляє собою коливальну ланку . В виразі , що приведений вище, постійна часу

$$T = \frac{1}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_y}} \quad (1.13)$$

Представляє собою період власних незгасаючих коливань , де прискорення є вхідною , а X- вихідною величиною .

Також варто зазначити , що акселерометри лінійних прискорень можуть бути використані як датчики перевантажень [5]. Для того щоб чітко ввести визначення поняття перенавантаження, напишемо рівняння сил , що можуть діяти на вимірювач. Для найліпшого відображення реальної ситуації приймемо літальний апарат як вимірювальне середовище .

$$m\dot{V} = P + R + G \quad (1.14)$$

В даному рівнянні :

$\dot{V}$  - абсолютне лінійне прискорення відносно центра мас ЛА;

P- сила тяги ;

R- аеродинамічна сила ;

G- сила тяжіння .

Проведемо перетворення і приведемо вираз (1. 14) до вигляду:

$$\dot{V} = \frac{P+R}{m} + \frac{G}{m} = \dot{V}_k + g = \left( \frac{P+R}{G} + 1 \right) \frac{G}{m} = (n+1) \frac{G}{m} \quad (1.15)$$

В даному виразі  $n$ - перенавантаження.

З вищезгаданого рівняння можна зробити наступний висновок : перенавантаження –це відношення сил негравітаційної природи до сил гравітаційної природи

$$n = \frac{P+R}{G} . \quad (1.16)$$

Припустимо , що необхідно вимірювати перенавантаження в вертикальній площині ; в такому разі необхідно на ЛА встановити датчик лінійних прискорень так , щоб його вісь чутливості співпадала з віссю ЛА . В даному випадку ми маємо так налаштувати акселерометр , щоб для горизонтального руху зміщення інерційної маси відповідало величині перевантаження

$$n_y = \frac{Y}{G} = 1 .$$

В даному виразі  $Y$ - під'ємна сила негравітаційної природи .

$G$  – сила тяжіння літака ( сила гравітаційної природи )

Вібраційна перенавантаження  $j$  можна визначити вздовж будь якого напрямку на основі виразу :

$$j = X_0 \frac{4\pi^2 f_s^2}{g} \quad (1.17)$$

В даному виразі  $X_0$ - є амплітудою вібрації ,

$f_s$  – частотою вібрації ,

і , відповідно,  $g$ - прискорення вільного падіння .

Зазначимо, що у випадку знаходження датчика перенавантаження на об'єкті, що здійснює вільне падіння під дією лише сили тяжіння, його показання не будуть відрізнятися від нуля. Це демонструє наступний вираз:

$$X = -\frac{m}{K_y}(\dot{V}_x - g_x)$$

При вільному падінні прискорення корпусу та прискорення чутливого елемента мають однакове значення, і відповідно, дорівнюють  $g_x$ .

З цього слідує те, що абсолютне прискорення  $\dot{V}_x = g_x$ . Звідки  $x=0$ . Таким чином прискорення вільного падіння неможливо виміряти за допомогою акселерометра.

Розглянемо вимірювальні ланцюги акселерометрів, що працюють за принципом прямого перетворення.

Послідовність перетворень фізичних величин в процесі вимірювання прискорення осьовим акселерометром може бути представлена у вигляді блок-схеми вимірювального ланцюга (рис. 1.3), на якій кожен елемент перетворення представлений у вигляді ланки з відповідною їй передавальною функцією.

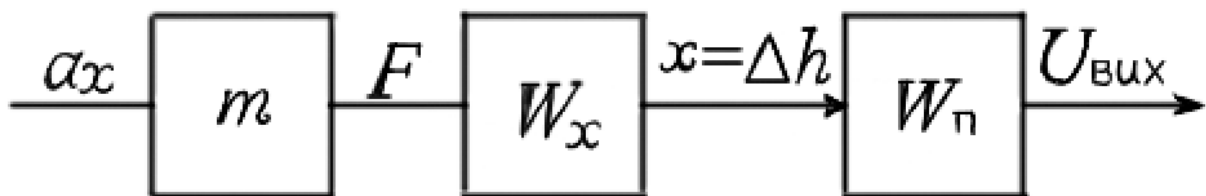


Рис. 1.3 – блок-схема вимірювального ланцюга акселерометра.

Величина  $m$  інерційної маси ЧЕ являється по суті коефіцієнтом передачі першої ланки, на вхід якої надходить вимірюване прискорення  $a_x$ , а виходом являється інерційна сила  $F$ . На вхід наступної ланки  $W_x(s)$ , передавальна функція

якої визначається залежністю (1.12), поступає інерційна сила  $F$ , а виходом є переміщення  $x$  інерційної маси. Виходом перетворювача переміщень з функцією передачі  $W_p(s)$  є напруга  $\Delta U$ , котра потім після проходження через активний фільтр з функцією передачі  $W_f(s)$  перетвориться в вихідну напругу  $U_{вих}$  [1].

Передавальна функція перетворювача переміщень у більшості акселерометрів може бути представлена у вигляді коефіцієнта передачі, рівного крутизні робочої характеристики перетворювача переміщень, тобто .:

$$W_n \approx K_n = \frac{\Delta U}{x} \quad (1.18)$$

Реалізація фільтру може варіюватись в залежності від вимог до якості перехідного процесу, полосі пропускання частот та інших . Як правило передатна функція фільтру відповідає коливальній ланці :

$$W_\phi(s) = \frac{U_{вих}(s)}{\Delta U} = \frac{K_\phi}{T_\phi^2 s^2 + 2\xi_\phi T_\phi s + 1} \quad (1.19)$$

В даному виразі коефіцієнт  $K_\phi$ - це постійна часу  $T_\phi$ , а відносний коефіцієнт демпферування  $\xi_\phi$  фільтра визначаються номіналами електронних компонентів схеми .

В відповідності з рисунком 1.3 і з урахуванням виразів (1.12)(1.18)(1.19), передаточна функція акселерометра має вигляд :

$$S_m = \frac{B_{p^a} S_p}{B_D} \quad (1.20)$$

Якщо в вищезгаданому виразі ми прийmemo  $s=0$  ,то з даного виразу ми зможемо виділити важливий технічний коефіцієнт , а саме масштабний коефіцієнт  $(B/(m, c^2))$ .

$$K_M = K_\Pi K_{\text{ЧЕ}} K_\phi$$

Важливою характеристикою акселерометра є також нестабільність  $K_m$ , в тому числі його температурна нестабільність, обумовлена в процентах від номіналу для заданих умов роботи. Очевидно, цей параметр залежить від нестабільності всіх компонентів величини  $K_m$ . Амплітудно-частотні, фазо-частотні характеристики і перехідний процес вимірювального ланцюга можуть бути побудовані на основі відомих процедур з передавальної функцією вимірювального ланцюга при формальній заміні  $s = j\omega$  ( $\omega$  - частота). Послідовність перетворення фізичних величин при вимірюванні прискорення маятникових акселерометром показана у вигляді блок-схеми вимірювального ланцюга на рис. 1.4.

Передбачається, що передавальні функції перетворювача переміщень і фільтра аналогічні описаним вище.

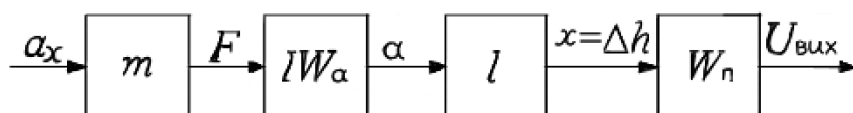


Рис. 8.4 - Блок-схема вимірювального ланцюга маятникового акселерометра

Передбачається, що передавальні функції перетворювача переміщень і фільтра аналогічні описаним вище.

Ланка з коефіцієнтом передачі 1 переводить кутову міру переміщень інерційної маси в лінійну. Передавальна функція маятникового акселерометра відповідно до рис. 1.4 має вигляд:

$$W_{MA}(s) = \frac{U_{vux}(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{ml^2 K_n K_{ce} K_\phi}{(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)(T_\phi^2 s^2 + 2\xi_\phi T_\phi s + 1)} \quad (1.21)$$

Якщо в вищезгаданому виразі ми прийнемо  $s=0$ , то з даного виразу ми зможемо виділити важливий технічний коефіцієнт, а саме масштабний коефіцієнт ( $B/(m, c^2)$ ).

$$ml^2 K_n K_{ce} K_\phi$$

Коментарі щодо масштабного коефіцієнта, його нестабільності,

обчислення частотних характеристик і перехідного процесу аналогічні приведеним вище для осьового акселерометра. Тут слід нагадати тільки те, що маятниковий акселерометр більш сприйнятливий до прискорення, що діє за перехресними осями і для нього має місце так зване вібраційне зрушення нуля при «косій» вібрації підстави, відомий також як ефект Максвелла-Капіці.

У акселерометрах компенсаційного перетворення (компенсаційні акселерометри) сила, що ініціюється прискоренням, врівноважується інерційним елементом (тому компенсаційні акселерометри називають також акселерометрами врівноважувального перетворення). Така сила має зазвичай, електростатичну, магнітоелектричну або електромагнітну природу.

Врівноважуюча дія на ІМ створюється за допомогою ланцюга зворотного зв'язку (ланцюг врівноваження, компенсації).

### 1.3 Мікромеханічні осьові акселерометри

Основним конструктивним вузлом мікроакселерометров (МА) є чутливі елементи, принципові схеми яких наведені на рис. 1.5. Чутливий елемент включає в себе ІМ 1, пружні елементи 2 підвісу і опорну рамку (підставка) 3. Чутливі елементи, представлені на рис. 1.5, а, б, мають дві пари пружних елементів, хрестоподібно розташованих уздовж осей  $x, z$ , початок яких (осей) знаходиться в геометричному центрі пластин ІМ. ЧЕ за схемою 1.5, б може бути виготовлений з меншою жорсткістю підвісу в напрямку осі, перпендикулярної до площини  $xz$ .

Осі чутливості цих ЧЕ збігаються з віссю  $y$ , а підвіси ІМ можуть бути визначені як хрестоподібні.

ЧЕ, показані на рис. 1.5, в, г, д, містять по дві пари пружних елементів.

Пружні елементи кожної пари паралельні одній з осей  $x$ ,  $z$  і розташовані або уздовж протилежних крамок пластин ІМ (рис. 1.5, в), або паралельних крамок (рис. 1.5, г, д). Ці підвіси можуть бути названі  $z$ -подібними. Між ними є різниця, яка визначається місцем з'єднання пружного елемента з пластиною ІМ. На рис. 1.5, в, г пружні елементи своїми рухливими кінцями пов'язані з кутами пластин ІМ (косиметрично щодо геометричного центру пластин), а в схемі 1.5, д - з центрами пластин (симетрично щодо геометричного центру пластини).

пластин), а в схемі 1.5, д - з центрами пластин (симетрично щодо геометричного центру пластини).

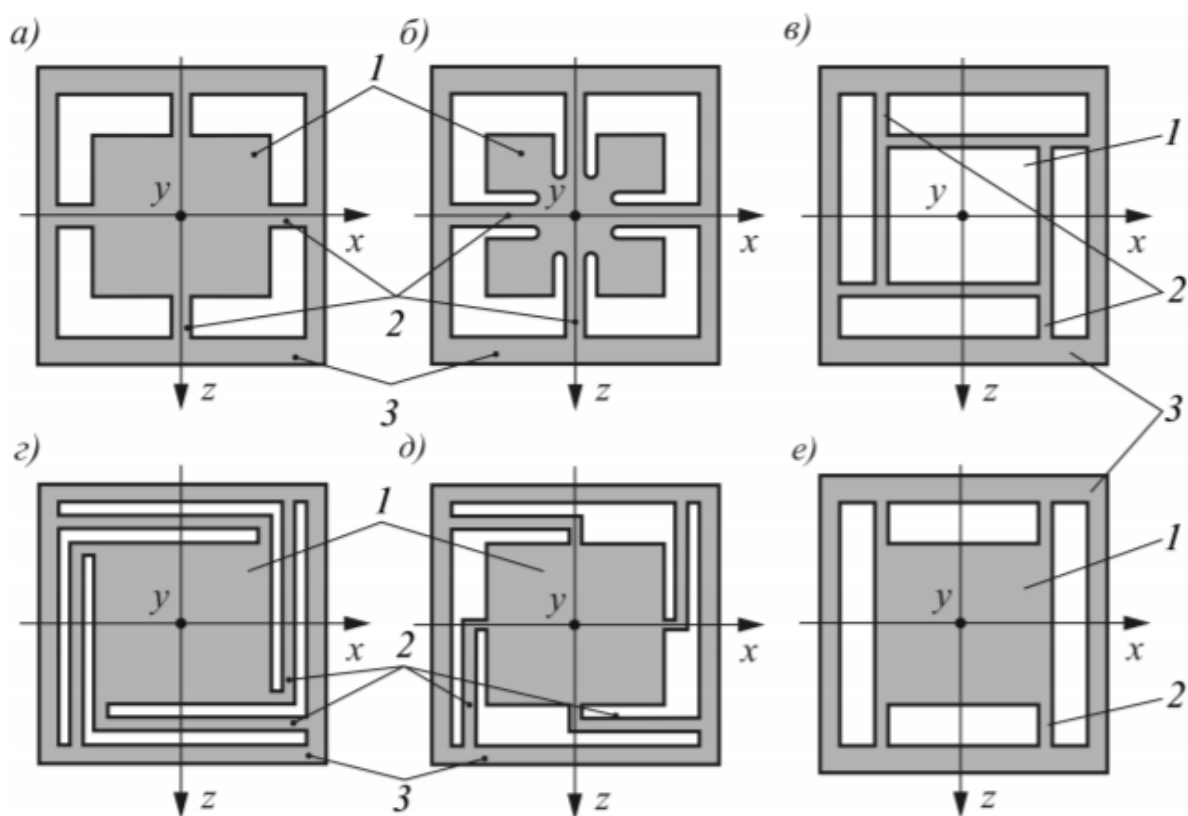


Рис. 1.5. Принципові схеми ЧЕ осьових МА:

Де а, б - ЧЕ з хрестоподібним підвісом; в, г - ЧЕ з z-образним кососиметричним підвісом; д - ЧЕ з z-подібним симетричним підвісом; е - ЧЕ з паралельним підвісом; 1 - ІМ; 2 - пружні елементи; 3 - опорна рамка.

Таким чином, підвіси ІМ по рис.. 1.5, в, г можуть бути визначені як z подібні кососиметричні, а по рис. 1.5, д - як z-подібні симетричні. ЧЕ за схемами 1.5, в, г, д мають осі чутливості, що збігаються з віссю у[1]. Очевидно, що геометричні розміри пружних елементів підвісів за схемами 1.5 г, д можуть бути підібрані так (особливо це відноситься до схеми 1.5, д), що ІМ буде чутлива до прискорення уздовж будь-якої з осей x, y, z. Таким чином, можливо побудова одно-, дво- і трикомпонентного МА на одному ЧЕ. ЧЕ по схемі 1.5, е може мати вісь чутливості, що збігається з віссю у або x.

Розглянемо деякі конструкцій МА, ЧЕ яких реалізовані за схемами, наведеними на рис. 1.5.

#### **1.4 Мікромеханічний нахиломір**

Фірма Endevco (США) випускає осьової акселерометр з ємнісним перетворювачем переміщень в габаритних розмірах  $25 \times 16 \times 10$  мм, ЧЕ якого виконаний як показано на рис. 1.1, б. Діапазон вимірювання: 0,5 ... 10 g. Демпфірування - газодинамічне. Смуга пропускання частот до 1000 Гц. Точність в залежності від замовлення і вартості: 5, 1 і 0,1% від максимального діапазону.

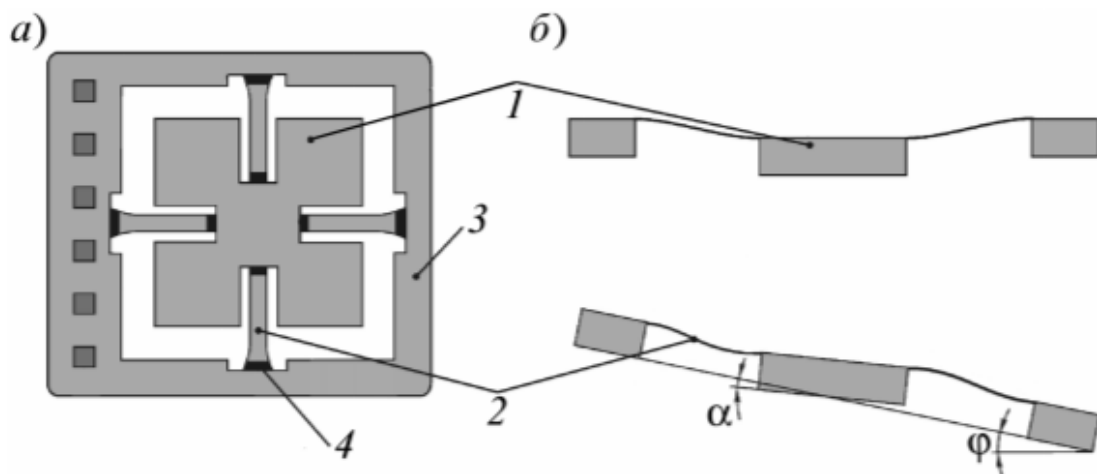


Рис. 1.6. Мікромеханічний нахиломір

Де а - схема нахиломіри; б - принцип вимірювання (нахил датчика на кут  $\varphi$  призводить до нахилу рухомий маси на кут  $\alpha$  відносно рамки датчика); 1 - ІМ; 2 - пружні елементи (балки) підвісу; 3 - опорна рамка; 4 – п'єзореzystори.

Подібна схема ЧЕ покладена в основу мікромеханічного нахиломіра, схема якого наведена на рис. 1.6, а. ІМ 1 прикріплена чотирма тонкими кремнієвими балками 2 до опорної рамці 3. Балки розташовані в межах маленьких проміжків ІМ. Чутливість збільшується разом з довжиною підтримуючих балок і досягає максимуму для деякого відношення довжини балки до розміру ІМ[7].

Як принцип перетворення обраний п'єзореzистивний ефект, що призводить до відносної зміни сигналу від нахилу, які приблизно на 60% більше, ніж для ємнісного знімання тієї ж самої інформації. Принцип вимірювання показаний на рис. 1.6, б. Кут нахилу може бути отриманий з вихідного сигналу двох повних мостів Уїтстона. Нахил датчика навколо однієї осі викликає S-образне викривлення тих балок, які орієнтовані перпендикулярно до осі нахилу. Балки, паралельні осі нахилу, відчують

кутові навантаження

Помістивши п'єзореzистори 4 зосереджено і перпендикулярно до подовжньому напрямку балок, довільний кут нахилу можна визначити незалежно для обох осей по падінню напруги на двох мостах Уїтстона. Розміщення і орієнтація резисторів гарантують високу чутливість до нахилу і малу перехресну чутливість. П'єзореzистори отримані р-домішковим кремнієм. У розробленому приладі прийняті наступні розміри: довжина пружної балки 500 мкм, ширина 70 мкм і товщина 5 мкм для розмірів пластини ІМ  $5 \times 5$  мм.

### 1.5 Акселерометр фірми Texas Instruments Inc.

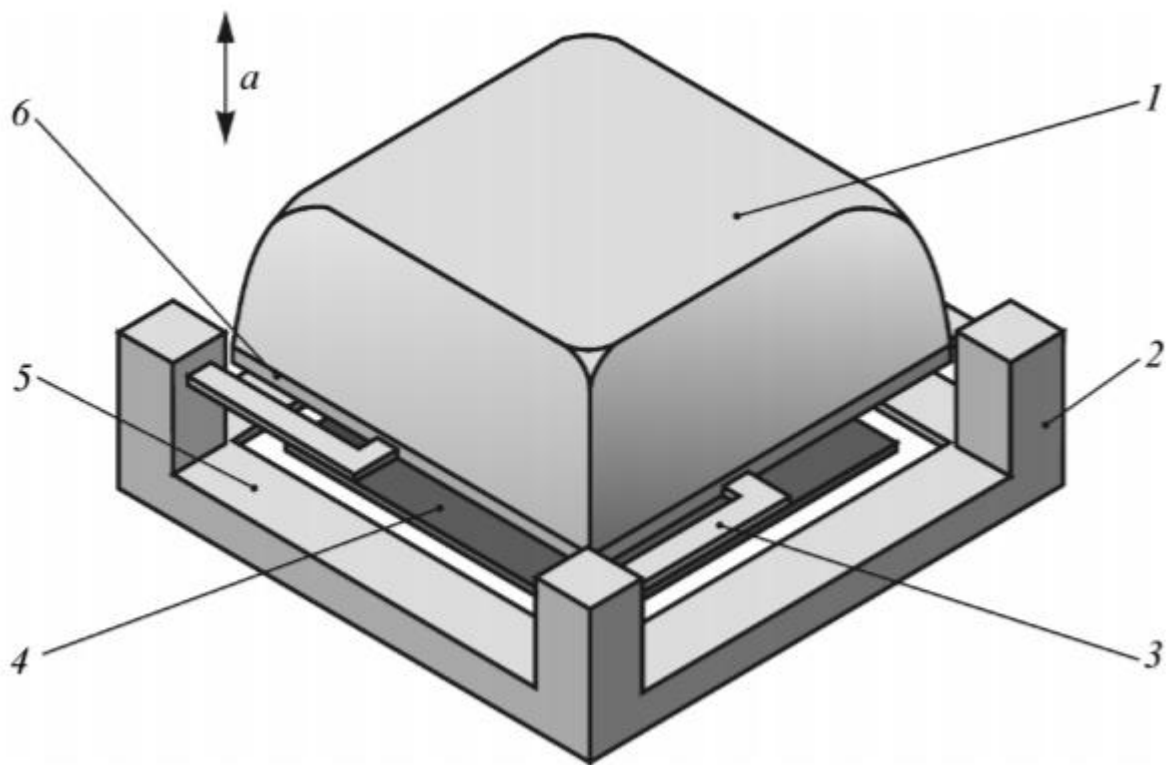


Рис. 1.7. Основні елементи конструкції акселерометра фірми Texas Instruments Inc  
.: 1 - ІМ; 2 - стійка; 3 - пружний елемент підвісу; 4 - нерухомий електрод; 5 - підстава; 6 - пластина з рухомим електродом

На рис. 1.7 показані основні елементи конструкції МА фірми Texas Instruments Inc. (США), ЧЕ якого відповідає схемі, показаної на рис. 1.5, д.

ІМ 1 (див. рис. 1.7), чутлива до переміщенням з прискоренням  $a$ , представляє єдине ціле з пластиною 6, на якій розміщений також рухливий електрод ємнісного вимірювача переміщень маси, нерухомий електрод 4 якого розташований на підставі 5. Подивись ІМ виконаний за допомогою чотирьох пружних елементів 3 на стійках 2, що є елементами підстави 5.

Очевидно, що чутливість акселерометра до вимірюваного прискорення поліпшена шляхом збільшення ІМ. Зорове сприйняття конструкції дає підставу припустити, що це - низькочастотний акселерометр, придатний

для сейсмічних вимірювань.

### 1.6 Акселерометр фірми Cornell Research Foundation Inc

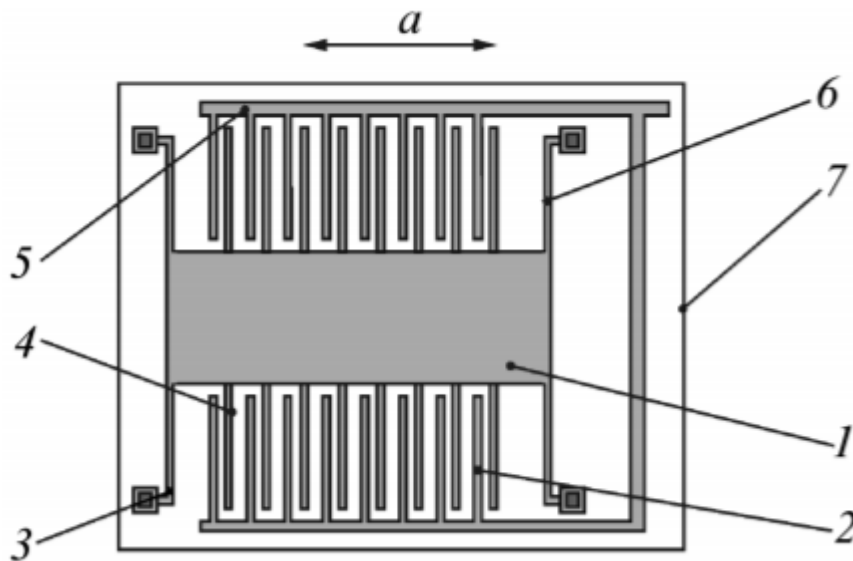


Рис. 1.8. Принципова схема

акселерометра фірми Cornell Research Foundation Inc .:

1 - ІМ; 2 - нерухомі електроди; 3 - анкер; 4 - рухливі електроди; 5 - рамка; 6 - пружний елемент підвісу; 7 – підстава (Корпус)

На рис. 1.8пріведена принципова схема МА фірми Cornell Research

Foundation Inc. (США), ЧЕ якого відповідає схемі на рис. 1.5, е. ІМ 1 змонтована паралельно і на деякій відстані. від заснування (корпусу) 7 за допомогою двох пар пружних елементів 6 підвісу і анкерів 3. ІМ переміщається відповідно до що вимірюється прискоренням  $a$ [4].

Ємнісний вимірювач переміщень утворений гребінчастими структурами електродів, з яких рухливі електроди 4 утворюють єдину структуру з ІМ, а нерухомі 2, об'єднані рамкою 5, скріплені з підставою.

## 1.7 Модифікований акселерометр

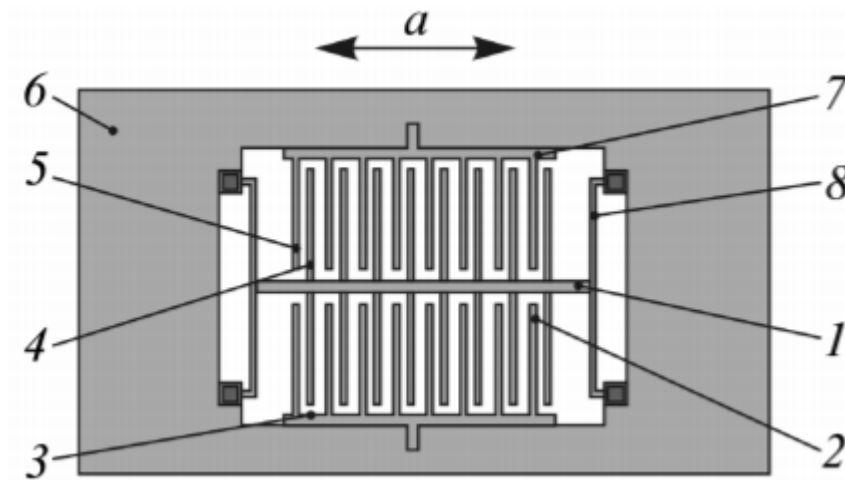


Рис. 1.9. Принципова схема модифікованого акселерометра:

1 - стрижень (частина ІМ); 2, 5 – нерухомі електрода; 3, 7 - борти структури;  
4 - рухливий електрод; 6 - пластина; 8 - пружний елемент підвісу

На рис. 1.9 показана принципова схема акселерометра, яка є розвитком схеми, представленої на Мал. 1.8. Відмінність її полягає в тому, що всі елементи конструкції розташовані в одній площині. ІМ утворена стрижнем 1 з елементами 4 гребенчастої структури, які є рухомими електродами ємнісного перетворювача переміщень ІМ відповідно до прискоренням  $a$ , а нерухомі електрода 2 і 5 оформлені у вигляді гребінчастих структур 3 і 7. Ці структури ізолювані від пластини 6 оксидною плівкою.

### Висновки по розділу 1.

В розділі 1 представлено огляд конструкцій лінійних акселерометрів прямого та компенсаційного вимірювання. Описані мікромеханічні вимірювачі прискорення та їх основні елементи.

Представлені основні конструктивні схеми ,теоретичні відомості що до їх вимірювання та особливості конструктивного виконання.

## РОЗДІЛ 2.

### ПРОЄКТУВАННЯ ЛІНІЙНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

#### 2.1 Структурна схема приладу

Принцип дії осьового акселерометра з системою самодіагностики показаний на кресленні 1, тобто на кресленні структурної схеми.

Вимірюване прискорення  $F_x$  діє на чутливий елемент, а саме на інерційне тіло  $M$ , що кріпиться до рухомої частини ємнісного датчика 1 опосередковано через демпфери 6, що гасять затухаючі коливання інерційної маси. Це допомагає зменшити час підготовки приладу до нового вимірювання. Рухомі частини ємнісного датчика лінійних переміщень 1 в свою чергу кріпляться в корпусі за допомогою гофрованої мережевої мембрани 2, яка забезпечує максимальну легкість переміщення ЧЕ вздовж осі чутливості, і при цьому, завдяки особливостям своєї конструкції, максимально ускладнює зміщення ЧЕ вздовж інших осей, що значно зменшує пов'язані з цим похибки вимірювача.

Обмотка 3, що розташована на каркасі циліндричної форми, знаходиться в радіальному проміжку магнітної системи, а торець каркасу з пластиною 4 укріплений за допомогою ізоляторів на полюсному наконечнику 5, утворює ємнісний лінійний перетворювач. Даний перетворювач, що, в свою чергу має ємність  $C_x$  вмикається в вимірювальний міст, що отримує живлення від високочастотного генератора  $\Gamma[6]$ . У наслідок дії сили  $F_x$  інерційна маса  $M$  і пов'язані з нею рухомі частини приладу зміщуються на величину  $\Delta X$ , що в свою чергу призводить до зміни ємності  $C_x$ . Вихідний сигнал вимірювального моста  $\Delta U_{\Sigma}$  подається на підсилювач ПС, де, власне, піддається підсиленню. Потім вже підсилений сигнал подається на демодулятор ДМ, де він випрямляється. Випрямлений струм проходить через міліамперметр  $mA$  та зразковий опір  $R_n$ , де знімаються параметри струму, і формується вихідний сигнал пристрою. Далі струм подається на обмотки 3 таким чином і з таким розрахунком, щоб сила  $F = \beta I$ , що виникає в наслідок електромагнітної взаємодії току з

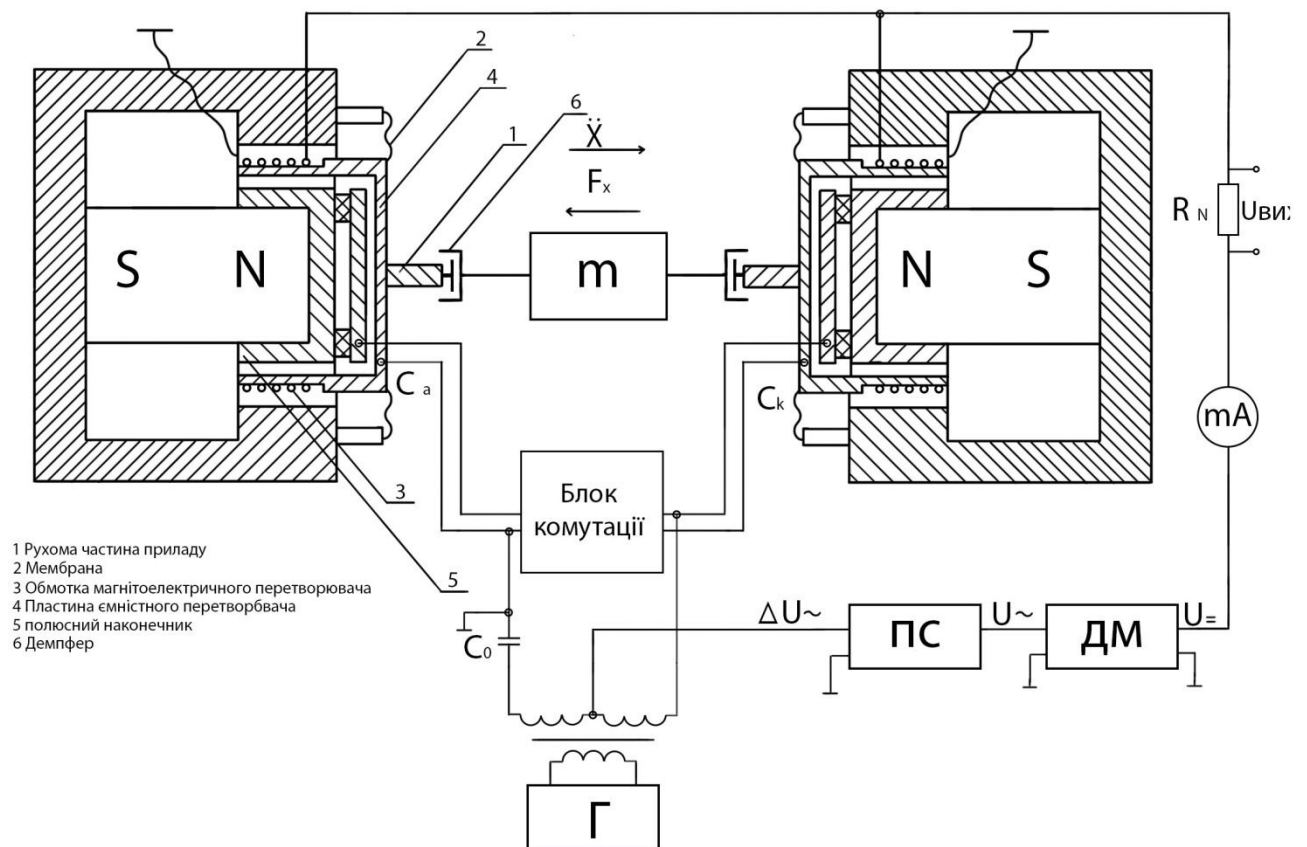


Рис. 2.1. Кінематична схема приладу:

магнітним полем була направлена назустріч вимірюваній силі  $F_x$  і врівноважувала її, таким чином повертаючи інерційну масу на своє попереднє положення. При таких переміщеннях закономірно виникають затухаючі коливання інерційної маси, що вкрай негативно впливає як на точність вимірювань, так і на час готовності приладу для нового вимірювання.

Для зменшення впливу небажаних коливань та для їх швидшого погашення в конструкції передбачені демпфери 6, що опосередковано зв'язують інерційну масу з ємнісними датчиками.

Робота приладу може бути описана наступним рівнянням:  $F_x = F_y + \Delta F$ . В свою чергу про величину вимірюваної сили можна робити висновки з сили току  $I$ , що вимірюється або опосередковано через міліамперметр  $mA$ , або через падіння напруги на зразковому опорі  $R_n$ . Як можемо бачити з вищеприведеного рівняння,

в установленому режимі зміщення  $\Delta X$  інерційної маси , і як наслідок , рухомої частини ємнісного датчика , викликається лише сигналом нерівноваги  $\Delta F$  , який буде тим менший , чим більший коефіцієнт підсилення каналу знаходження нерівноваги , тому система кріплення рухомої частини має мати достатню податливість , а ємнісний датчик більшу чутливість [3]. Перше забезпечується застосуванням гофрованої мереживної мембрани в якості головного елементу кріплення рухомої частини датчика до корпусу .

Конструктивно обернений перетворювач,( в нашому випадку магнітоелектричний ),і ємнісний датчик лінійних переміщень поєднані в рамках одного вузла .

## **2.2 Розрахунок системи підвісу чутливого елементу**

В направляючих з пружними зв'язками зміщення рухомого елементу відносно основи забезпечується пружними деформаціями гнучких стрічок, пластин, мембран. Для формування прямолінійного руху каретки використовують пружні кінематичні пристрої (ПКП).

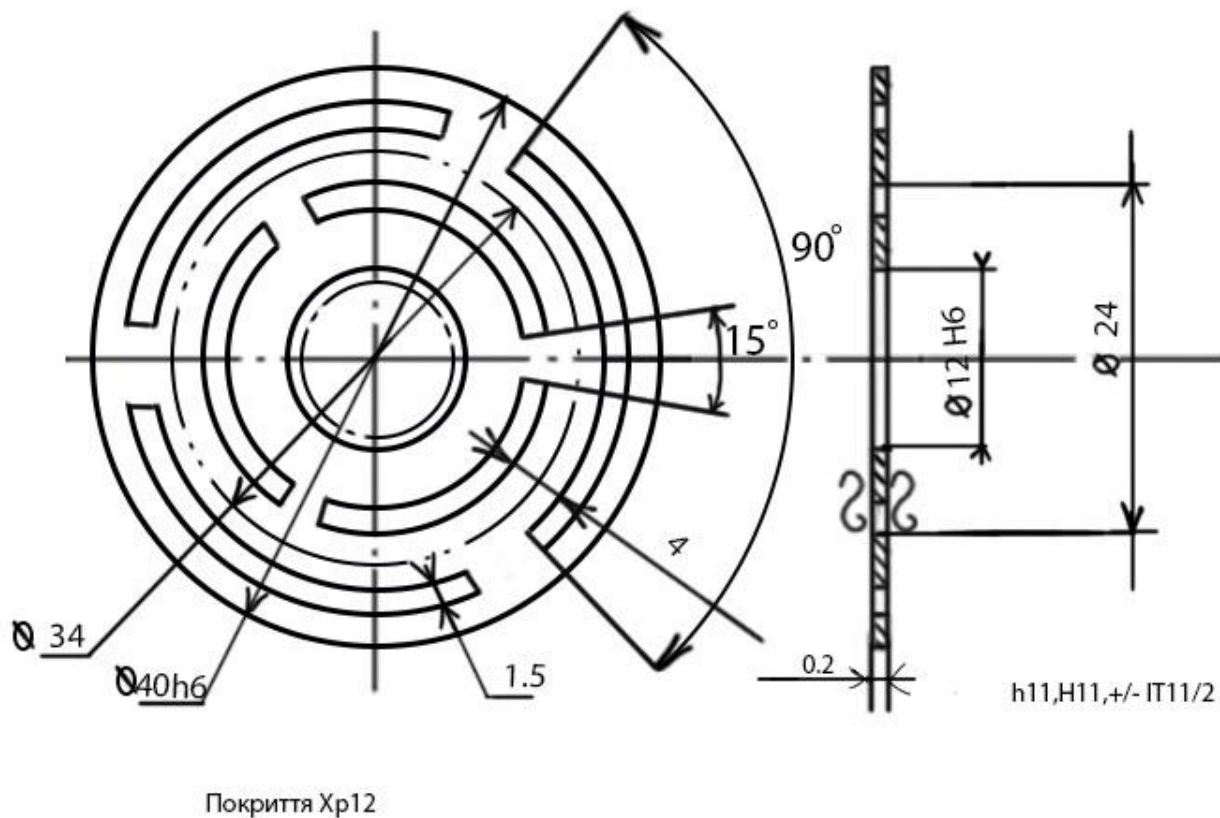


Рис 2.2. Мембранний пружний елемент системи підвісу ЧЕ

Для виготовлення пружних елементів використовують: стрічку сталеву пружинну холоднокатану (ГОСТ 2416-65 та ГОСТ 2283-69) із сталі У8...У12 (ГОСТ 1435-74); бронзову стрічку (ГОСТ 1048-70, ГОСТ 1789-70) із бронзи Бр.Ф7 (ГОСТ 18175-72); стрічку із прецезійних сплавів (ГОСТ 14117-69), із сплавів 40КХНМ, 36НХТЮ и др. (ГОСТ 10994-74); сільфони (ГОСТ 21482-76).

*Загальні рекомендації по проектуванню:*

1. Із збільшенням робочої довжини підвісу робочої каретки збільшується точність наведення. При малій вазі каретки та незначному поперечному зусиллі характер траєкторії не залежить від розмірів бази та жорсткості стрічок.
2. При просторовому навантаженні кути перекосу каретки для заданого ходу переміщення робочої каретки зменшуються зі збільшенням робочої

довжини підвісу робочої каретки, розміру бази та зі зменшенням товщини стрічки[7].

3. Товщина пластини (стрічки) повинна бути не менше 0,05 робочої довжини підвісу робочої каретки.
4. Для зменшення перекосу каретки зусилля потрібно прикласти до приставного елемента каретки на рівні 0,5 робочої довжини підвісу робочої каретки.

Кріплення мембран до кареток здійснюється зачekanкой , клиновим затискачем, клеєнням або пайкою, накладками з гвинтовим затискачем.

Технічні вимоги до розмірів та поверхонь зацемлення пружних елементів:

1. Взаємна паралельність всіх поверхонь зацемлення стрічок та мембран - не більше 0,01...0,02 на 100 мм.
2. Різниця розмірів баз рухомої та нерухомої кареток не повинна перевищувати 0,003...0,01 мм.
3. Різниця симетричних розмірів робочої довжини підвісу робочої каретки не повинна перевищувати 0,005...0,01 мм.
4. Не перпендикулярність поверхонь зацемлення відносно базової повздовжньої осі руху кареток – не більш 0,005...0,01 на 100 мм.
5. Не перпендикулярність ліній зацемлення стрічок та мембран , відносно загальної базової площини руху кареток – не більше 0,005...0,01 на 100 мм.
6. Радіус закруглення в зоні зацемлення стрічок та пластин 0,02...0,05 мм.
7. Шорсткість поверхонь зон зацемлення мембран і пластин повинна бути не нижче 9 класу по ГОСТ 2789-73 ( $Ra=0.16...0,32$ ).

Специфіка роботи пружних кінематичних пристроїв визначається наявністю допоміжних поздовжньо затиснутих, за границею стійкості, стрічок, які мають характерну форму при початковому положенні направляючої ланки. В даному

положенні відстань між рухомими кінцями допоміжних стрічок буде дорівнювати довжині основних стрічок.

Для наближеного розрахунку малих переміщень на пружних напрямних із перфорованими пластинами можна скористатися прийомом відображення їх (пластин) на прямокутну полосу з вирізами.

При цьому суцільне кільце перетворюється в суцільну стрічку. Переміщення  $S_{1k}$  кінця прямокутної плоскої стрічки визначається залежністю

$$S_{1k} = \frac{QL_{nl}^3}{Eb_{nl}h^3}, \text{ де}$$

$Q$  - діюче навантаження;

$L$  - довжина пластини;

$E$  – модуль пружності матеріалу мембрани;

$b, h$  – довжина і ширина полоси мембрани.

Робоча частина пластини з кільцевим вирізом таким же способом перетворюється в суцільну прямокутну пластину із заділкою.

В результаті, наближений вираз для переміщення рухомого кінця матиме вигляд:

$$S_{1k} = \frac{Q(1n\rho_n)^2(\pi - \nu_1 - \nu_2)^3}{(\ln e)^2 \left( \ln \frac{\rho_n}{\rho_{вн}} \right)^2 Eh^3}$$

Пластина з круговими вибірками зображується в вигляді прямокутної пластини з прямокутними отворами (рис.2м). Зацімлення пластини та її відображення помічені штриховкою, а рівномірне переміщення краю позначене штрих-пунктиром[5].

Після виконання необхідних перетворень, отримаємо наближену розрахункову залежність для переміщення такої пластини для достатньо жорстких перемичок:

$$S_1 = \frac{2Q\rho_{cp}^3}{eEbh^3},$$

де  $\rho_{cp}$  – середній радіус мембрани.

### 2.3 Розрахунок мембрани

Вибираємо матеріал мембрани: Бронза БрОФ-10-2; ГОСТ

Модуль пружності матеріалу  $E=10^5$  МПа;

Товщина мембрани  $h=0.2$ мм;

Зовнішній діаметр  $D=50$ мм;

Внутрішній діаметр  $d=20$ мм;

Маса мембрани  $m=20 \cdot 10^{-3}$  кг

Прискорення  $a=10$  g.

Знайдемо коефіцієнт жорсткості пружини  $c$ :

$$c = \frac{Q}{x},$$

де  $Q = m \cdot a$ ,

$x$  – переміщення чутливого елемента ( $5 \cdot 10^{-4}$  м)

Підставимо дані значення в формулу для визначення жорсткості і знайдемо жорсткість мембрани

$$c = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 12}{5 \cdot 10^{-4}} = 4.8 \cdot 10^2 \frac{H}{m}$$

Знайдемо прогин мембрани при малих переміщеннях за формулою:

$$\lambda = [3 \cdot (1 - \mu^2) / 16] \cdot p \cdot R^4 / (E \cdot h^3),$$

Задавшись певними розмірами мембрани, знайдемо тиск

$$P = \frac{Q}{F_{\text{эф}}}$$

$$\text{де} \quad F_{\text{эф}} = \frac{\pi D^2 - \pi d^2}{4}$$

Розрахуємо ефективну площу за вибраними геометричними розмірами мембрани

$$F_{\text{эф}} = \frac{\pi 50^2 - \pi 20^2}{4} = 1.6 \cdot 10^{-3} m^2$$

Підставимо всі значення в формулу для визначення тиску і отримаємо

$$P = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 12}{1.6 \cdot 10^{-3}} = 150 \frac{H}{m^2} = 1.5 \cdot 10^{-4} MPa$$

Тоді прогин мембрани буде дорівнювати:

$$\lambda = \left[ \frac{3 \cdot (1 - 0.3^2)}{16} \right] \cdot \left( \frac{1.5 \cdot 10^{-4} \cdot 0.03^4}{10^5 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^3} \right) = 1.5 \cdot 10^{-4} m$$

## 2.4 Розрахунок магнітоелектричної системи перетворювача струм - переміщення

Магнітоелектричні системи (МЕС) застосовуються в якості елементів перетворювачів, виконаних за схемою з компенсаційним способом вимірювання, або ж в якості виконавчих елементів.

Основними параметрами МЕС є: споживана потужність, хід рамки  $x$ , величина сили на рамці  $Q_p$ , коефіцієнт перетворення  $k_s$ . Споживана потужність виконаних конструкцій МЕС коливається в межах 10- 1 500 мвт, причому в одному конструктивному виконанні можливо втілити системи з споживаною потужністю в межах від 1: 25. Тому для діапазоні 10 - 500 мвт потрібно всього 3 виконання: 10-250, 25-600, 600- 1 500 мвт, що відрізняються за габаритними розмірами. Хід рамки визначається призначенням пристрою: в електропневматичних перетворювачах з дроселюванням повітря методом «сопло - заслінка» значення  $X$

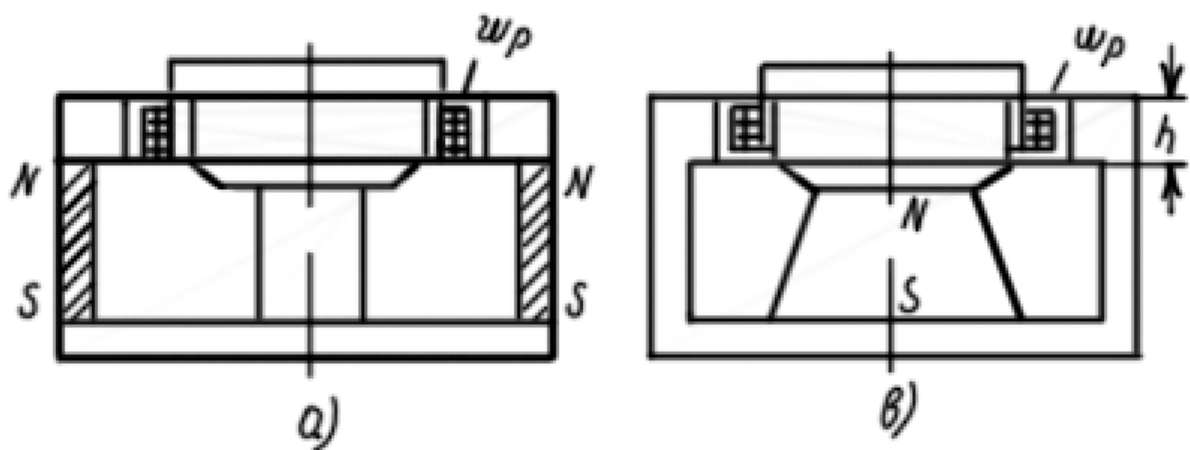


Рис. 2.3. Конструктивні форми магнітних систем МЕМ.

а - з порожнистим циліндричним магнітом; б - із суцільним магнітом.

досягає  $\pm 0,4$  мм, в електрогідравлічних системах для струменевих трубок  $\pm 2$  мм, для золотників  $\pm 4$  мм.

У виконаних МЕС значення сили  $Q_p$  знаходиться в межах від 0,05 до 0,5 кгс. Рамка МЕС з'єднується зазвичай з пружинами[1]: плоскими при малому ході, гвинтовими циліндричними - при значних переміщеннях

Жорсткість пружин визначається по граничній силі

і граничному ходу:

$$C = \frac{Q_{p \text{ макс}}}{X_{m \text{ макс}}}$$

Конструктивні форми. У практиці знайшли застосування дві основні конструктивні форми МЕС: з постійним магнітом у вигляді порожнього циліндра і з круглим суцільним магнітом (рис.2.3). Найбільше розповсюдження в пристроях автоматики отримала друга форма конструкції. У цій конструкції над магнітом встановлюється круглий черевик з магнітом'якого матеріалу. Діаметр черевика вибирають більшим діаметра магніту.

Кріплення постійних магнітів може бути здійснено склеюванням їх з деталями магнітопроводу- основою і полюсними черевиками.

Основні характеристика перетворювача — сила на рамці

$$Q_p = R \sqrt{L_m S_m P},$$

де  $k$  - коефіцієнт, який визначається конструкцією МЕС

$L_m$ ,  $S_m$  - довжина і площа поперечного перерізу постійногоного магніту;

$P$  - споживана потужність рамки.

Розміри постійного магніту. Для зменшення розмірів пристроїв застосовують магніти з висококоерцїтивних сплавів, наприклад Альніко V. Та прагнуть

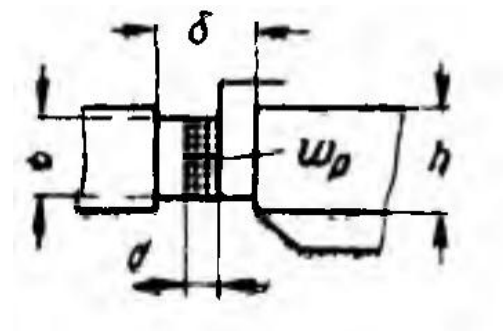


Рис. 2.4. Ескіз рамки МЕМ,

до максимального використання вільної магнітної енергії в зазорі магніту і в розрахунках враховують оптимальні його величини  $B_D$  і  $H_0$  (див. рис. 2-4). Площа перетину магніту знаходиться за формулою

$$S_m = \frac{B_p S_p}{B_D},$$

де  $S_p = l_p h$  - середня площа перерізу робочого зазору,  $m^2$

$l_p$  - середня довжина кільцевого прорізу .

Довжина магніту

$$L_m = \frac{c_1 B_p \delta}{H_D \mu}$$

де  $c_1$  - коефіцієнт, що враховує падіння магнітного потенціалу в неробочих зазорах системи;

$\delta$  - довжина зазору між полюсним черевиком і ярмом

Дані обмотки рамки конструктивно задаються

розмірами  $b$  і  $d$  рамки[4]. Для визначення числа витків приймаються додаткові співвідношення

$$\omega_p = m b d, \quad r = r_0 l_p \omega_p$$

де  $m$  - число витківна ;.  $r_0$  - опір на 1 м мідного дроту.

З отриманих співвідношень маємо :

$$\frac{\omega_p^2}{r} = \frac{m b d}{r_0 l_p} = C_n \frac{b d}{l_p}$$

де  $C_n = m / r_0$  - величина постійна для дротів, не суттєво відрізняються за діаметром.

Для дротів діаметром 0,1, 0,06, 0,08 мм значення

Сн дорівнює в середньому  $25 \cdot 10^6$

Площа перетину міді намотування

$$q_n = f_n \frac{bd}{\omega_p}$$

де  $f_n$  - коефіцієнт заповнення обмотки, рівний в середньому 0,5 для зазначених розмірів дротів.

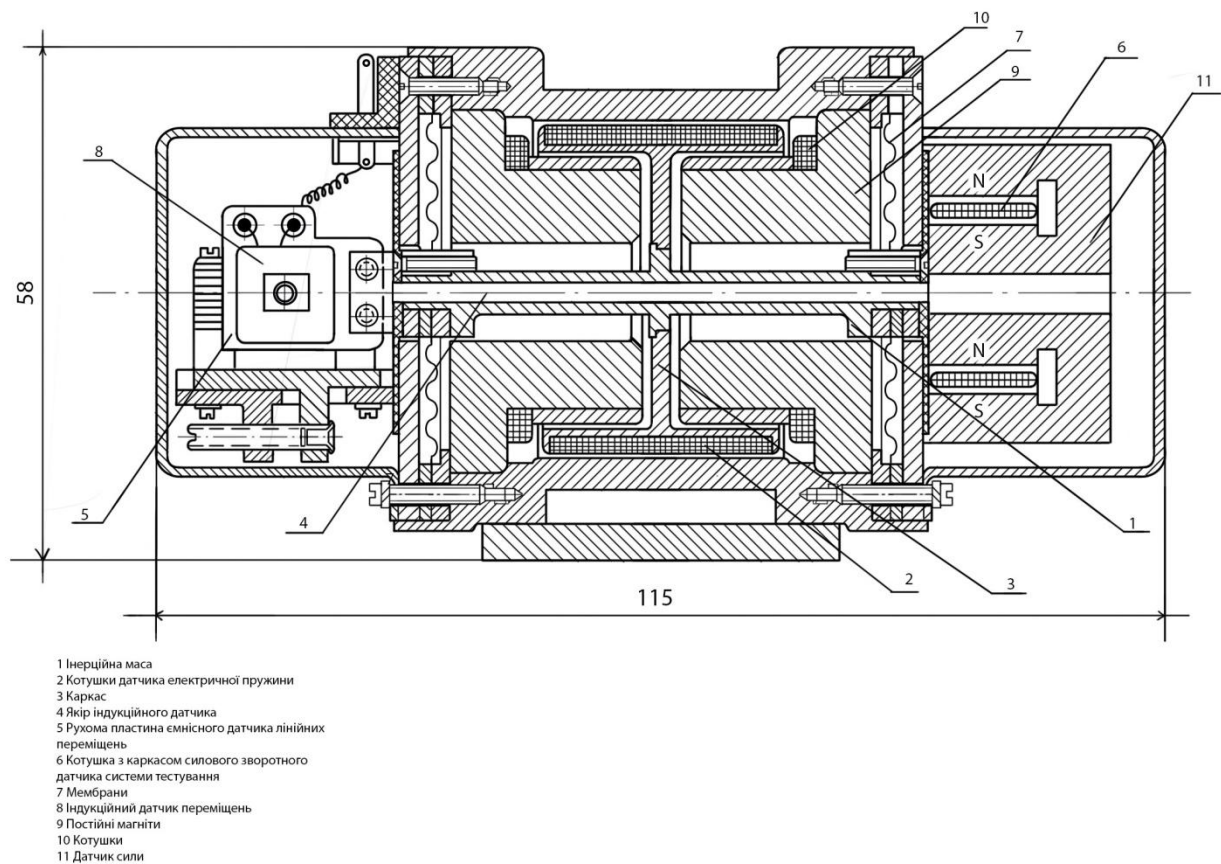


Рис 2.4 збіркове креслення акселерометра

## 2.5 Розрахунок магнітоелектричного датчика сили

В роботі проведено розрахунок магнітоелектричного датчика сили з наступними параметрами:

Струм в рамці рамки 5 ма, опір не вище 2 000 ом.

$$P_{\text{макс}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 = 50 \text{ мвт}$$

При розрахунку потрібно приймати деякі параметри на підставі практичних даних.

У найбільш раціонально побудованих моделях значення  $V_r$  знаходяться в межах 0,2 - 0,23 тл,  $\delta$  - в межах 1,5-2,5,  $C_1$  - в межах від 1,1 до 1,4,  $I_p$  - близько 0,125 м.

Приймемо: матеріал магніту Альніко V.

$$BD = 0,9 \text{ тл} \setminus H_D = 4 \cdot 10^4 \text{ а/м};$$

Та основні параметри магніту:

$$\begin{aligned} \text{£ } p = 0,2 \text{ тл}; c = 2,0; c_i = 1,2; /p = 0,125 \text{ м}; h = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}; 5 P = 0,125 - 12 \cdot 10^{-2} = \\ 1,5 - 10^{-3} \text{ м}^2; \delta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b = 0,01 \text{ м}; d = 0,003 \text{ м}. \end{aligned}$$

Тоді площа перерізу магніту

$$S_m = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 6,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

а діаметр магніту -

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} = 29 \text{ мм}$$

Приймаємо середній діаметр магніту 30 мм.

Тоді довжина магніту

$$L_m = \frac{1,2 \cdot 0,2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^4 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 16 \text{ мм}$$

Приймаємо питому щільність струму

$$\omega_p = \sqrt{\frac{rc_n bd}{l_p}} = j = 1 \text{ а / мм}^2$$

Тоді площа перерізу дроту

$$q = f_n \frac{bd}{\omega_p} = 0.433 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2, \text{ та}$$

діаметр дроту

$$d_{np} = \sqrt{\frac{4q}{\pi}} = 0.074 \text{ мм}$$

Округляємо  $d_{np} = 0.08 \text{ мм}$ .

Уточнення числа витків рамки 3 000;  $r = 1\,500 \text{ ом}$ .

Сила на рамці  $Q_p = 0.02 \cdot 0.2 \cdot 0.025 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 3\,000 = 0.038,2 \text{ кгс} \approx 38 \text{ гс}$ .

Споживана потужність

$$P = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = 37.5 \text{ мвт}$$

В даному виконанні системи за рахунок збільшення споживаної потужності можна отримати значно більші величини сили на рамці. Зі збільшенням споживаної потужності  $P$  сила збільшується пропорційно кореню квадратному з  $P$ .

## 2.6 Опис роботи акселерометра.

Конструкція осевого лінійного акселерометра з силовою компенсацією і системою самотестування представлена на рис.2. Чутливим елементом приладу служить рухома система (інерційна маса  $m$ ) 1.

До неї входять котушки датчика електричної пружини 2 з каркасом 3, якір індукційного датчика 4, рухома пластина ємнісного датчика лінійних переміщень 5 та котушка з каркасом силового зворотного датчика системи тестування 6.

Витки котушок 2 і 6 намотані по циліндричній поверхні так, що всі робочі довжини котушок є активні.

Рухома частина акселерометра закріплена на спеціальних мембранах 7, які мають велику жорсткість в радіальному напрямку і малу в осьовому. Використання таких мембран забезпечує малу силу тертя в опорах і рух чутливого елемента тільки вздовж осі чутливості[2].

При дії прискорення  $a$  маси  $m$  відхиляється вздовж осі чутливості.

Переміщення маси  $x$  вимірюється індукційним датчиком переміщень 8. Вихідний сигнал  $U$  індукційного датчика пропорційний переміщенню  $x$ . В підсилювачі напруги  $U_1$ , підсилюється і перетворюється в напругу  $U_2$  після чого перетворюється в сигнал постійного струму  $i$ .

Струм  $i$ , що пропорційний діючому прискоренню, поступає на котушку зворотного зв'язку. Котушка зворотного зв'язку знаходиться в рівномірному магнітному полі, яке формується в двох постійних магнітах 9 (магніти мають форму стаканів і намагнічені по довжині).

Демпфування коливань рухомої системи акселерометра здійснюється за допомогою стаканчика і власного демпфування в закорочених обмотках самих котушок.

Для виправлення поля магнітної індукції в робочому зазорі установлені дві котушки 10.

Система самотестування складається з магнітоелектричного датчика сили 11 з циліндричними магнітами і котушками 6. Після подачі сигналу тестування та його підсилення на котушку 6 виникає осьова сила, що переміщує чутливий елемент в осьовому напрямку. Цей сигнал вимірюється ємнісним датчиком переміщень та передається в систему порівняння з каліброваними сигналами відгуків для подальшого формування заключення по його метрологічним характеристикам.

Така система тестування дає змогу перевірити коефіцієнт передачі акселерометра, а також при подачі спеціальної форми сигналу ще і динамічні характеристики акселерометра.

## 2.7 Опис системи самоконтролю

Функція самоконтролю вирішує дві задачі, По перше користувач може впевнитись у працездатності акселерометра. Тобто чи може інерційна маса здійснювати переміщення . По друге , прикладена електростатична сила дозволяє регулювати відхилення інерційної маси [6].

Робота акселерометра з функцією самоконтроля заснована на відхиленні маси від початкового положення.

В початковому положенні сума всіх сил діючих на інерційну масу дорівнює 0;

$$0 = mg - F_{\text{електро}} - k (x - x_0), \quad (2.2)$$

де  $m \cdot g$ - гравітаційна сила ,

$K \cdot x(x_0 - x)$  - повертаюча сила,

$F_{\text{eltctro}}$  - електростатична сила .

$$F_{\text{eltctro}} = 0.5 \cdot \pi \cdot e \cdot Ax(V / x) \cdot 2 \quad (2.3) -$$

де  $V$ - прикладена до електроду напруга ,  $A$ - площа електроду ,  $e$ - діелектрична постійна .

Якщо електростатична сила не прикладена , тобто має нульове значення , то зміщення  $\Delta x$  пропорційне прискоренню з коефіцієнтом пропорційності  $m/k$ . Це обумовлено конструкцією акселерометра . Зміщення може бути визначено за допомогою вимірювання вихідної напруги на основі моста Уітсона . Це модель

стандартного акселерометра без самоконтролю . Якщо електростатична сила прикладена, то рівняння (2.2) стає нелінійним.

$$0 = m \cdot g \cdot 9.8 - 0.5 \cdot \pi \cdot e \cdot A \cdot \frac{V^2}{X_0^2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta x}{X_0}\right)^2}$$

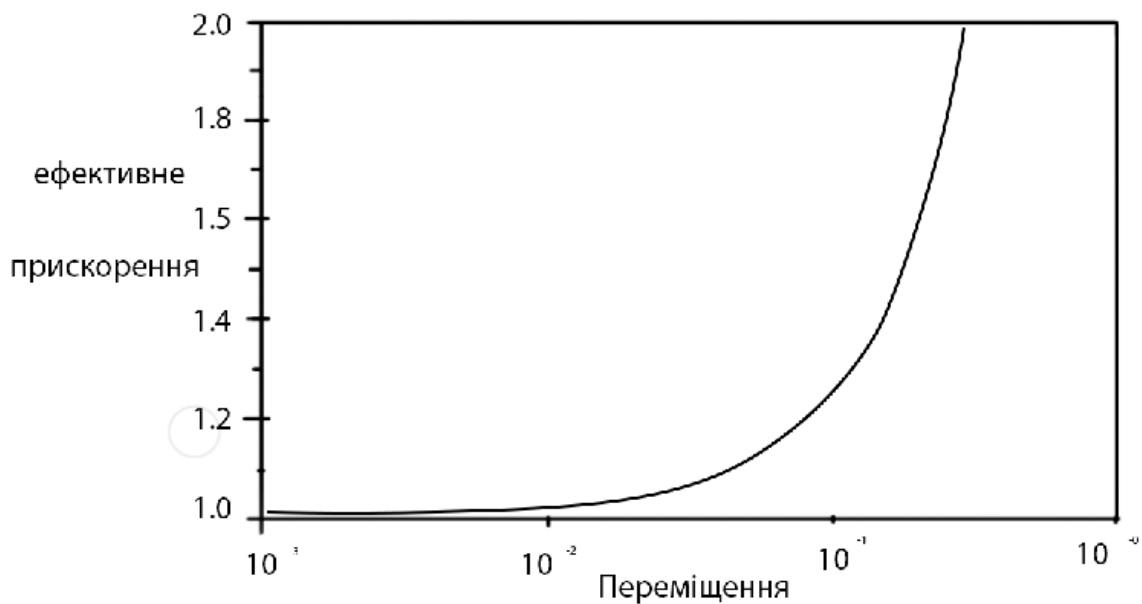


Рис 2.5 Залежність ефективного прискорення від переміщення інерційної маси

Для малого відхилення значення  $A$  може приблизно дорівнювати  $X_0$  так як електростатична сила може змінювати ширину проміжку. Помилка при цьому складає менше 10% . Зазвичай для акселерометра з динамічним діапазоном в 50g з проміжком в 5 мкм між інерційною масою і електроном електростатичне відхилення складає біля 3% повної шкали з загальною похибкою до 5,9% . Графік помилки відхиляючої сили для більшої електростатичної сили зображений на рис 2.5 . і він показує , що при наближенні часткового відхилення до одиниці похибка стає суттєвою .

Прикладена напруга до електроду надає прискорення інерційній масі

$$g = \frac{\pi \cdot e \cdot A \cdot V^2}{19.6 \cdot m \cdot x_0^2}$$

при умові малого відхилення . Прискорення (прискорююча сила ) залежить тільки від прикладеної напруги  $i$  , по суті, не залежить від температури  $t$  і чутливості акселерометра[6] . Цим обумовлено застосування такої системи для калібрувальних цілей .

Здатність до самоконтролю збільшує надійність датчиків , так як забезпечується контроль зовнішнього середовища , що пов'язані з акселерометром і силою , що відхиляє його інерційну масу .

Здатність до самоконтролю також значно зменшує складність схеми керування датчиком [6].

### **Висновок**

В даному дипломному проекті були описані та розглянуті основні види та типи сучасних лінійних акселерометрів , в тому числі і мікромеханічних. Були описані принципи їх роботи та конструктивні особливості . На основі описаних приладів та їх характеристик був розроблений прилад , характеристики якого підходять під вимоги до проекту . Була розроблена кінематична схема приладу , на основі якої можна наглядно продемонструвати принципи роботи приладу , та його концептуальні особливості наявності системи тестування . Було розроблене складальне креслення , а також креслення окремих деталей . Це дозволило продемонструвати конструктивні властивості приладу , та особливості притаманні для його збірки , як в цілому так і окремих елементів та вузлів .

Був проведений розрахунок окремих вузлів приладу . А саме: для пружного підвісу чутливого елемента та магнітоелектричного датчика сили.

### **Список використаної літератури**

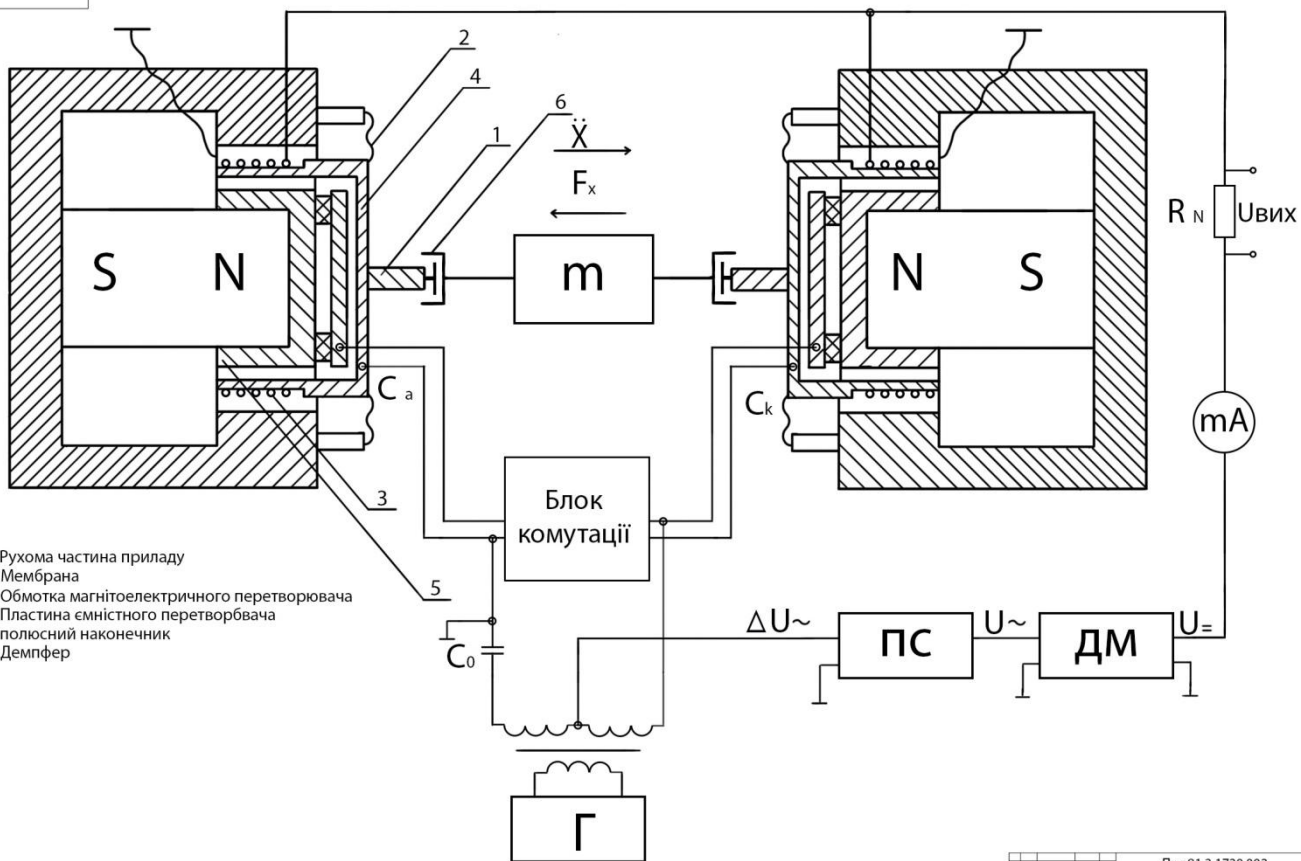
1. Андроник М.М., Бочков С.Д. Микромеханические системы. акселерометры и гироскопы . Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая научная весна 2016:Машиностроительные технологии
2. Снигур А.К. Методические указания к лабораторным работам по курсам"Основы теории измерительных приборов", "Проектирование измерительных приборов" Часть 1. Міністерство освіти і науки України. Національний університет кораблебудівництва імені адмірала Маркова. Миколаїв 2009
3. Ступель Ф.А. Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин принцип действия , схемы, расчет . Издавництво «Енергия» Ленинград 1965.
4. Синельников А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры методы и средства проверки и градуировки. Издательство стандартов , Москва 1979.

5. Никитин Е.А , Балашова А.А.. Проектирование интегрирующих и дифференцирующих гироскопов и акселерометров . «Машиностроение» Москва 1969.

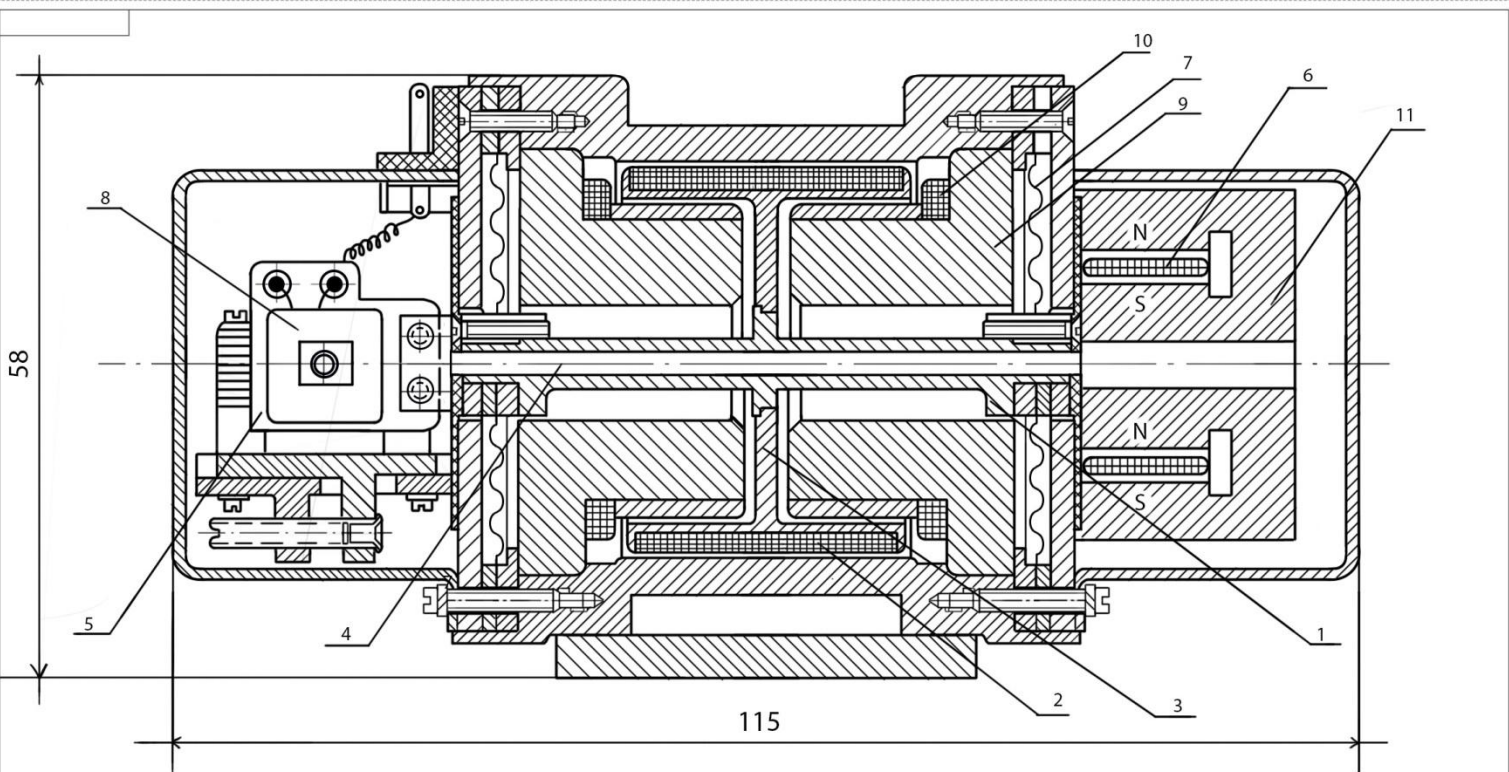
6. А. Балатирев Акселерометры компании Measurement Specialties компоненты и технологии № 7 2007. Стр 69-72.

7. Фоминов И.В. Идентификация коэффициента преобразования маятникового компенсационного акселерометра в условиях орбитального полёта космического аппарата . Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета , №4 \ 46 , 2014 с. 45-50.

ДОДАТКИ

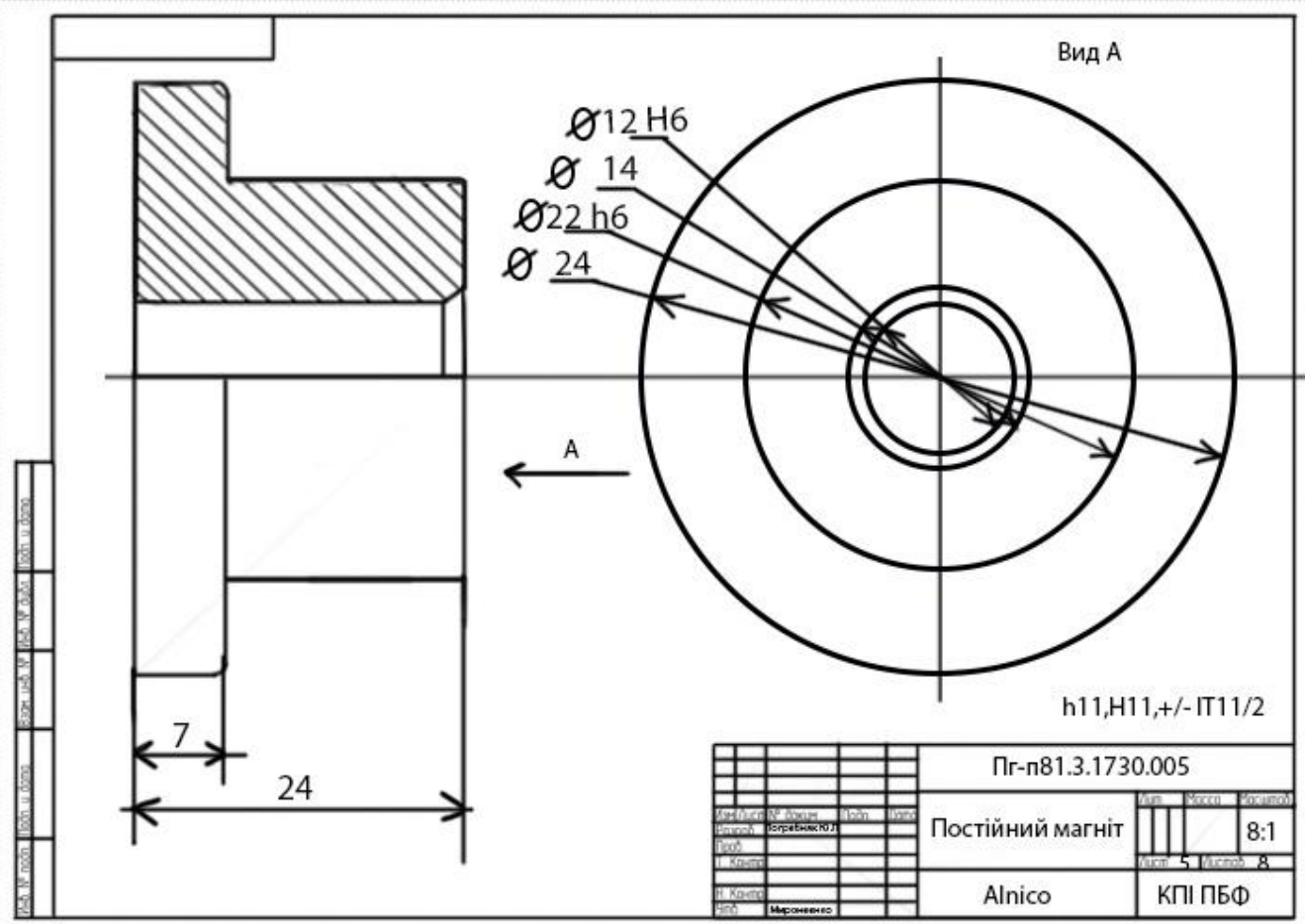


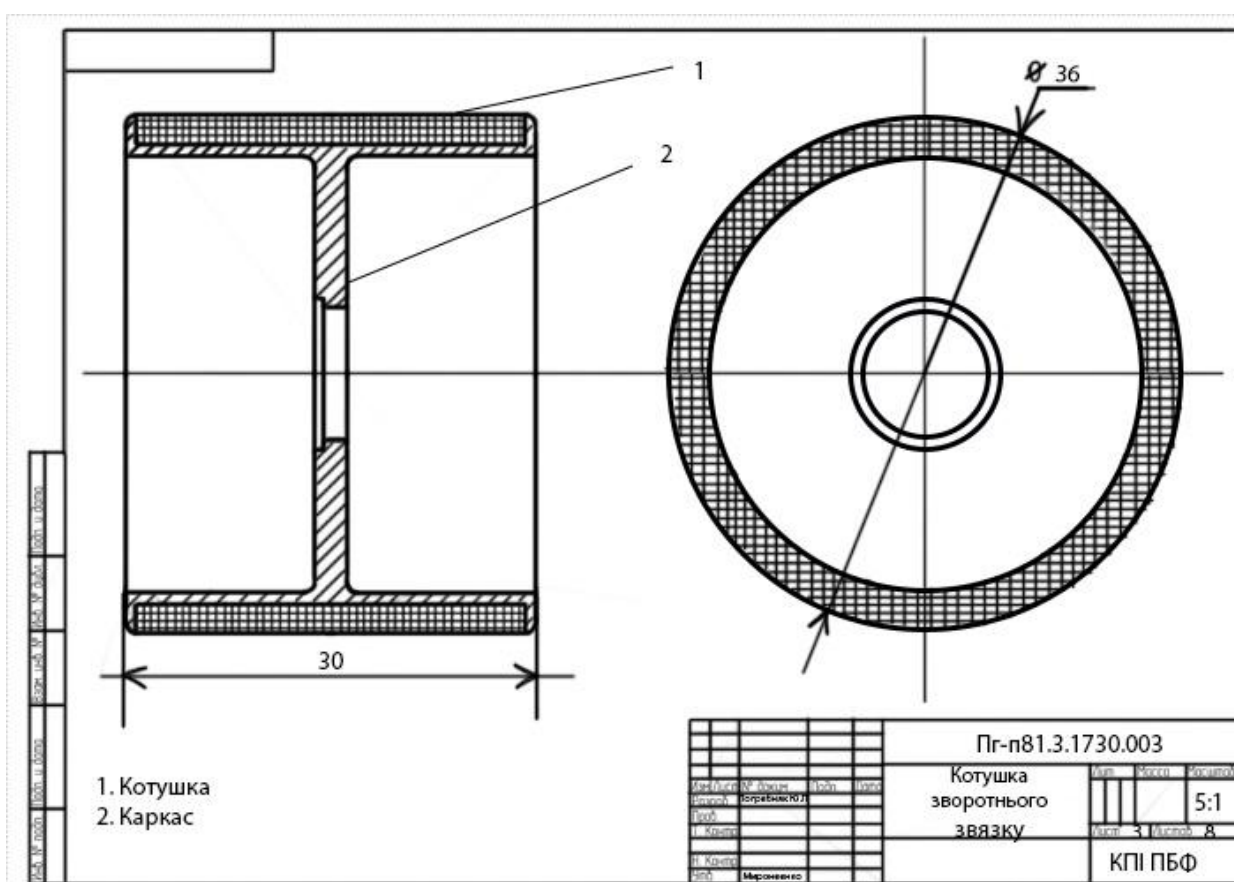
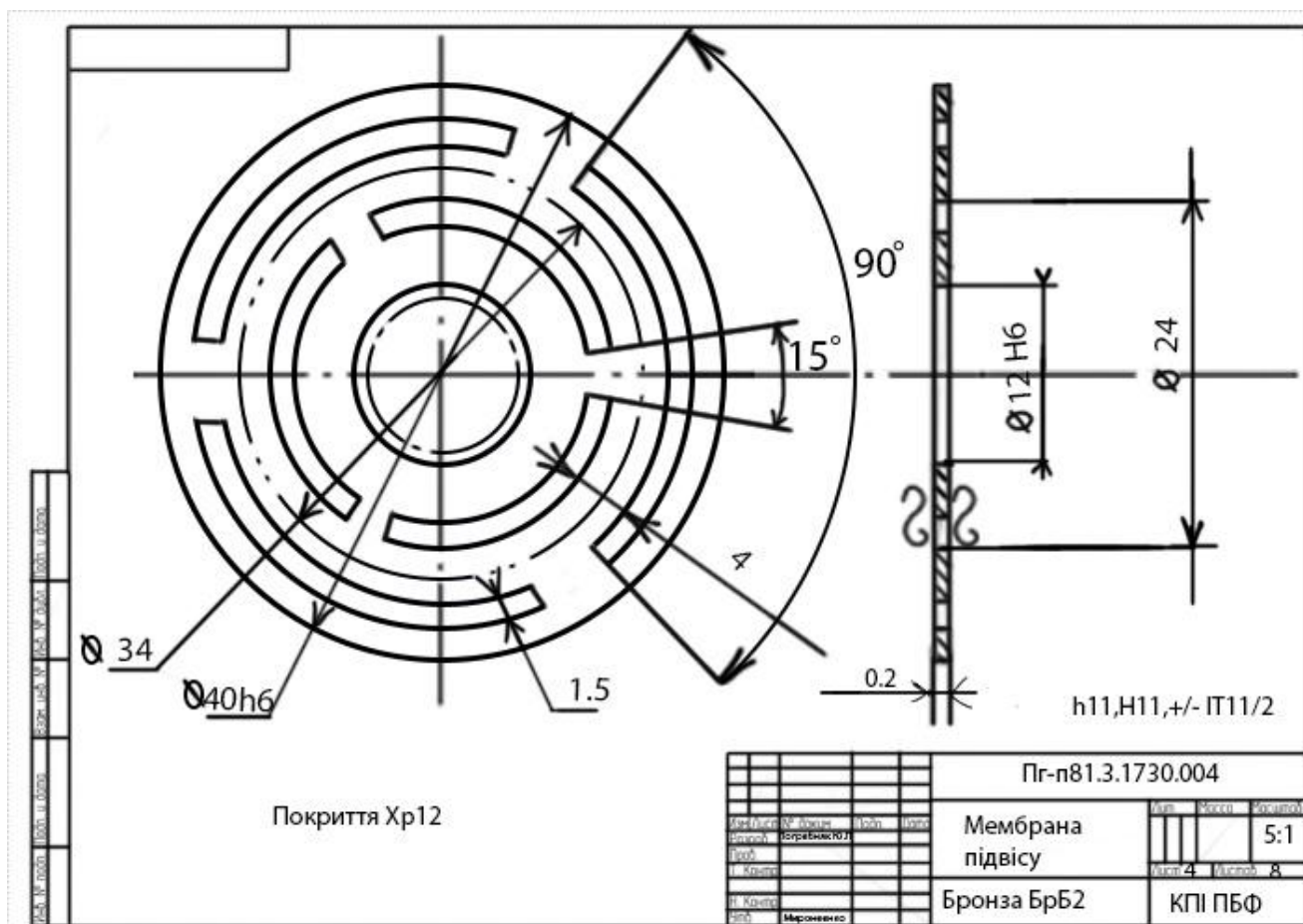
|                   |          |                   |               |          |
|-------------------|----------|-------------------|---------------|----------|
| Пр-n81.3.1730.002 |          | Кінематична схема | акселерометра | КПІ ЛБФ  |
| Деталь            | Вид      | Масштаб           | Масштаб       | Масштаб  |
| Матеріал          | Матеріал | Матеріал          | Матеріал      | Матеріал |
| Колір             | Колір    | Колір             | Колір         | Колір    |
| Група             | Група    | Група             | Група         | Група    |
| Розмір            | Розмір   | Розмір            | Розмір        | Розмір   |



- 1 Інерційна маса
- 2 Котушки датчика електричної пружини
- 3 Каркас
- 4 Якір індукційного датчика
- 5 Рухома пластина ємнісного датчика лінійних переміщень
- 6 Котушка з каркасом силового зворотного датчика системи тестування
- 7 Мембрани
- 8 Індукційний датчик переміщень
- 9 Постійні магніти
- 10 Котушки
- 11 Датчик сили

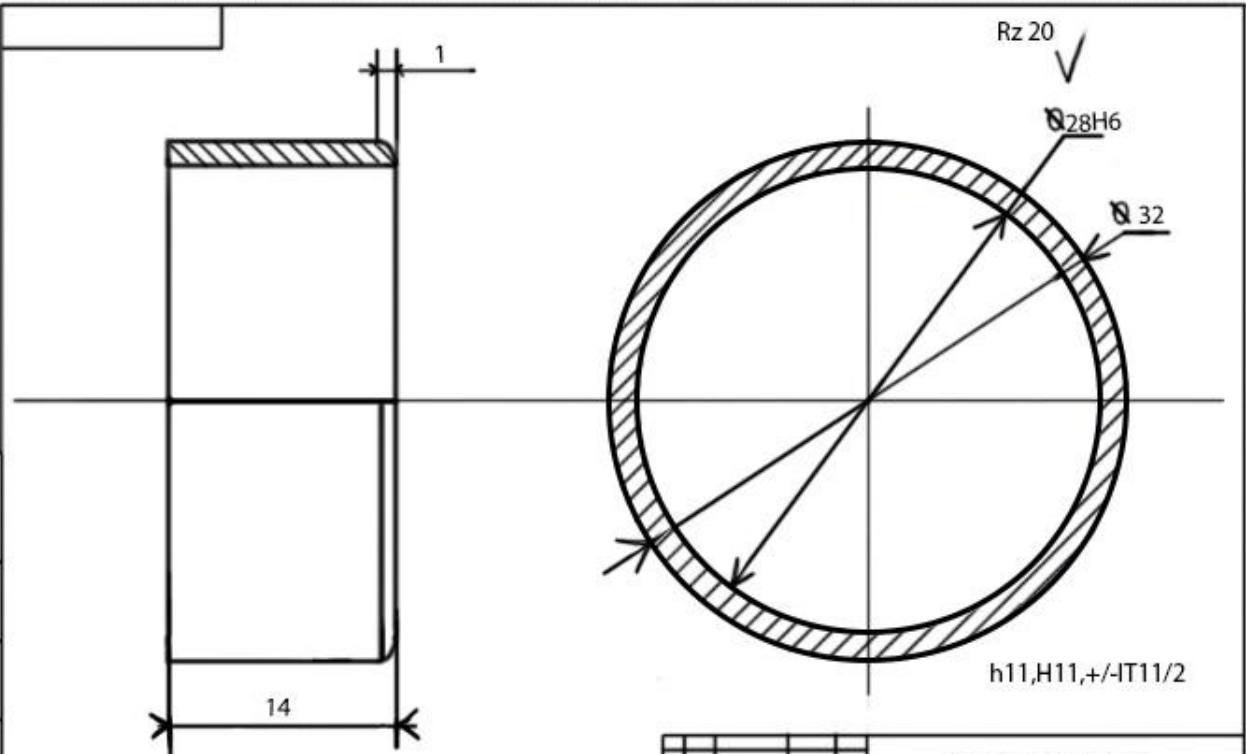
|                   |           |      |        |                              |      |         |
|-------------------|-----------|------|--------|------------------------------|------|---------|
| Пр-n81.3.1730.001 |           |      |        | Дат.                         | Маса | Масштаб |
| Мат. Алюмін.      | В. Дюрал. | Пол. | Латунь | Низькочастотний акселерометр |      |         |
| Мат. Алюмін.      | В. Дюрал. | Пол. | Латунь | Акс.                         | 2    | 1:1     |
| Мат. Алюмін.      | В. Дюрал. | Пол. | Латунь | КПІ ПБФ                      |      |         |







|             |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |
| ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. | ІНСТ. ІНСТ. |



|            |             |      |      |                      |         |           |
|------------|-------------|------|------|----------------------|---------|-----------|
|            |             |      |      | Пг-п81.3.1730.007    |         |           |
| Автомат    | № докум.    | Дата | Лист | Прижимний<br>циліндр | Мат.    | Масштаб   |
| Вироб.     | Ісправність |      |      |                      | 2:1     |           |
| І. Контр.  |             |      |      | Д16Т Гост21488       | Мат. 7  | Масштаб 8 |
| ІІ. Контр. |             |      |      |                      | КПІ ПБФ |           |
| Авт.       | Місцевість  |      |      |                      |         |           |