

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

Приладобудування

(повна назва інституту/факультету)

Приладобудування

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 681.2.084

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

М.Д. Гераїмчук

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“__” грудня 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістр**

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірю-

вальна техніка (Інформаційні технології та

вимірювальні системи механіки)

(код і назва)

на тему: Тензометричні системи з механічними підсилювачами деформації

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ПІ-71мп

(шифр групи)

Вікторова Надія Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник старший викладач Зайцев В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту доцент, к. е. н. Бояринова К.О.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент головний конструктор АТЗТ «Укрвеском» Коломієць Ю.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Київ – 2018 року

Магістерська дисертація

на тему: Тензометричні системи з механічними підсилювачами деформації

Київ – 2018 року

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

Факультет _____ Приладобудівний _____
(повна назва)

Кафедра _____ Приладобудування _____
(повна назва)

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

Спеціальність(спеціалізація) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (Інформаційні технології та вимірювальні системи механіки)
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М.Д.Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» листопад 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Вікторівій Надії Вікторівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Тензометричні системи з механічними підсилювачами деформації _____

науковий керівник дисертації Зайцев В.М., старший викладач _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4078-с

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018р

3. Об'єкт дослідження: чутливі елементи тензорезисторних вимірювальних систем _____

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) 4.1 Вимірювальна фізична величина – відносна механічна деформація; 4.2 Тип перетворювача - тензорезисторний; 4.3 Діапазон вимірюваних деформацій мінус $3000 \cdot 10^{-6} \dots +3000 \cdot 10^{-6}$; 4.4 Границі допустимих абсолютних похибок в діапазоні вимірювання $\pm 0,5\%$; 4.5 Габаритні розміри, не

більше, мм 10x90x30; 4.6 Діапазон робочих температур мінус 10...+40⁰С;
4.7 Маса, не більше, кг 0,2.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд матеріалів за темою магістерської дисертації. Розробка структурної схеми перетворювача. Розрахунок статичних та динамічних характеристик. Метрологічний аналіз характеристик. Проведення експериментальних досліджень. Розробка стартап-проекту. Висновки.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу 6.1 Матеріали аналітичного огляду 1 арк. ф.А1; 6.2 Презентаційний аркуш 1 арк. ф.А1; 6.3 Складальне креслення перетворювача 1 арк. ф. А1; 6.4. Лист графічних залежностей 1 арк. ф. А1; 6.5 Структурна схема 1 арк. ф. А2; 6.6 Електрична схема 1 арк. ф. А2; 6.7 Лист експериментальних досліджень 1 арк. ф.А1. Загальна кількість графічного матеріалу – 6 арк. ф. А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій Пружний елемент цифрового перетворювача відносних деформацій з механічним підсилювачем

8. Консультанти розділів дисертації*

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

9. Дата видачі завдання 2 листопада 2018р

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1 | Ознайомлення з завданням | 17.09.2018 | |
| 2 | Проведення аналітичного огляду матеріалів | 24.09.2018 – 28.09.2018 | |
| 3 | Розробка принципів схем | 28.09.2018 – 5.10. 2018 | |
| 4 | Розрахунок метрологічних характеристик | 5.10.2018 – 19.10.2018 | |
| 5 | Проведення аналізу точності вимірювання | 19.10.2018 - 5.11.2018 | |
| 6 | Розробка стартап-проекту | 5.11.2018 - 26.11.2018 | |
| 7 | Оформлення текстової та графічної частини | 26.11.2018 – 3.12.2018 | |
| 8 | Представлення МД на перевірку науковому керівнику | 3.12.2018 – 10.12.2018 | |

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

| | | | |
|---|--|-------------------------|--|
| 9 | Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів сервісом Unichек | 10.12.2018 - 12.12.2018 | |
|---|--|-------------------------|--|

Студент

(підпис)

Н.В. Вікторова

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

В.М. Зайцев

Реферат

Магістерська дисертація: 97 с., 34 рис., 33 табл., 2 додатки, 17 бібліографічних найменувань.

Об'єкт дослідження: чутливі елементи тензорезисторних вимірювальних систем.

Предмет дослідження: тензорезисторні системи з механічними підсилювачами деформації.

Мета дослідження: дослідження чутливого елемента тензометричного датчика деформацій, якій вимірює відносну деформацію в діапазоні від мінус $3 \cdot 10^{-3}$ до плюс $3 \cdot 10^{-3}$ із точністю 0,5%. Провести експериментальне дослідження тензорезисторного датчика для визначення актуальності його математичної моделі.

Задачі дослідження:

- провести огляд та аналіз матеріалів за темою;
- за метрологічними характеристиками вибрати матеріал, з якого буде виготовлено складові датчика, тензорезистор, цифровий підсилювач;
- дослідити метрологічні характеристики приладу;
- провести розрахунки на точність, надійність;
- провести експериментальне дослідження.

Актуальність дослідження: в будівлях з великими площами та прольотами, такими як виробничі цехи, криті автопарки, виставкові центри, великі павільони, мости, на несучі опори діють великі навантаження. Внаслідок перенавантаження опори руйнуються, що призводить до пошкодження обладнання, руйнування промислових та громадських об'єктів, фінансових збитків та летальних наслідків. Частіше це відбувається через налипання великої кількості снігу на дахах у зимовий період, а також перенавантаження мостів вантажівками.

Наукова новизна одержаних результатів: тензорезисторний датчик має цифровий вихідний сигнал, в той час як замітники мають аналоговий сигнал.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: даний прилад слід використовувати для визначення деформації та величини зміщення навантажених конструкцій споруд, таких як опори мостів, цехів, тощо.

Публікації: «Пружний елемент цифрового перетворювача відносних деформацій з механічним підсилювачем» XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у Приладобудуванні»; «Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі абсолютних деформацій» XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи».

Ключові слова: тензорезистор, деформація, чутливий елемент, підсилювач.

Abstract

Master's dissertation: 97 pages of 34 drawings, 33 tables, 2 supplements, 17 bibliographic titles.

Object of research: sensory elements of strain gauge measuring systems.

Subject of research: strain gauge resistor systems with mechanical deformation amplifiers.

The purpose of the study: the study of a sensitive element strain gauge deformation, which measures the relative deformation in the range $-3 \cdot 10^{-3} \dots + 3 \cdot 10^{-3}$ with an accuracy of 0.5%. To conduct an experimental study of a strain gauge sensor to determine the relevance of its mathematical model.

Research objectives:

- to review and analyze the materials on the topic;
- according to the metrological characteristics choose the material from which the components of the sensor will be made, strain gage, digital amplifier;
- to study the metrological characteristics of the device;
- to make calculations for accuracy, reliability;

- to conduct an experimental study.

Relevance of the study: in large-scale buildings and spans, such as production shops, covered car parks, exhibition centers, large pavilions, bridges, heavy loadings are present on supporting supports. As a result of overload, the supports are destroyed, which results in damage to equipment, destruction of industrial and public objects, financial losses and lethal consequences. This is most often due to the accumulation of large amounts of snow on the roofs in the winter, as well as the loading of bridges by trucks.

Scientific novelty of the obtained results: the strain gauge sensor has a digital output signal, while the substitutes have an analog signal.

Recommendations on the use of work results: this instrument should be used to determine the deformation and the magnitude of the displacement of loaded constructions of buildings, such as bridge supports, workshops, etc.

Publications: "The elastic element of a digital converter of relative deformations with mechanical amplifier" XIV All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Efficiency of engineering solutions in instrument making"; "Tensor Resistor Measuring Transformers of Absolute Deformations" XVII International Scientific and Technical Conference "Instrumentation: State and Prospects».

Keywords: strain gauge, deformation, sensing element, amplifier.

Зміст

| | |
|--|----|
| Перелік умовних позначень, символів та термінів..... | 10 |
| Вступ..... | 12 |
| 1 Огляд та аналіз матеріалів за темою магістерської дисертації..... | 13 |
| 1.1 Датчик деформації з аналоговим підсилювачем GEFRAN (Італія) SL76/80-AA..... | 13 |
| 1.2 Датчик деформації НВМ (Німеччина) SLB-700A/06-1..... | 15 |
| 1.3 Датчик ваги Keli Electric Manufacturing (Китай) SEBC-SS..... | 17 |
| 1.4 Датчик ваги Magtrol (США) KG-05..... | 18 |
| 1.5 Вибір складових перетворювача..... | 20 |
| 1.5.1 Вибір матеріалу пружного елемента..... | 20 |
| 1.5.2 Вибір тензорезисторів..... | 21 |
| 1.5.3 Вибір цифрового електронного підсилювача..... | 24 |
| 1.5.4 Вибір інтерфейсу передачі даних..... | 26 |
| 2 Метрологічне забезпечення вимірювання відносної деформації..... | 29 |
| 2.1 Схема передачі величини деформації..... | 29 |
| 2.1.1 Опис тензометричного датчика відносних деформацій..... | 29 |
| 2.1.2 Електрична схема підключення тензорезисторів..... | 30 |
| 2.1.3 Структурна схема тензометричного датчика деформацій..... | 32 |
| 2.2 Метрологічний аналіз характеристик досліджуваного засобу вимірювальної техніки..... | 36 |
| 2.2.1 Розрахунок надійності..... | 36 |
| 2.2.2 Розрахунок абсолютної та відносної похибки вимірювання..... | 37 |
| 2.2.3 Статична характеристика..... | 42 |
| 2.2.4 Амплітудо-частотна характеристика..... | 44 |
| 2.2.5 Фазочастотна характеристика..... | 47 |
| 2.2.6 Перехідна характеристика..... | 47 |

| | | | | |
|-----------------------------|------|------------------|--------|------|
| МД П171мп.03.00ПЗ | | | | |
| | | | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |
| Розроб. | | <i>Вікторова</i> | | |
| Перевір. | | <i>Зайцев</i> | | |
| Реценз. | | | | |
| Н. Контр. | | | | |
| Затверд. | | <i>Зайцев</i> | | |
| Пояснювальна записка | | | Літ. | Арк. |
| | | | 8 | 94 |
| НТУУ «КПІ» ім. Сікорського | | | | |

| | |
|---|----|
| 2.3 Розробка методики вимірювання деформації..... | 47 |
| 2.3.1 Перевірка нульового балансу..... | 49 |
| 2.3.2 Перевірка опору ізоляції..... | 50 |
| 2.3.3 Перевірка цілісності тензOMETричного моста..... | 50 |
| 2.3.4 Перевірка під навантаженням..... | 51 |
| 2.3.5 Градування тензOMETричного датчика деформацій..... | 51 |
| 3 Експериментальне дослідження тензOMETричної системи з механічним підсилювачем..... | 56 |
| 3.1 Підготовка експерименту..... | 56 |
| 3.2 Проведення експерименту..... | 58 |
| 3.3 Обробка результатів вимірювання..... | 60 |
| 3.4 Висновок..... | 65 |
| 4 Розробка стартап-проекту: ТензOMETрична система з механічними підсилювачами деформацій..... | 66 |
| 4.1 Опис ідеї проекту..... | 66 |
| 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту..... | 68 |
| 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту..... | 69 |
| 4.4 Розробка ринкової стратегії проекту..... | 77 |
| 4.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту..... | 80 |
| 4.6 Висновки..... | 84 |
| Загальні висновки..... | 86 |
| Перелік посилань..... | 88 |
| Додаток А Дані експериментального дослідження..... | 91 |
| Додаток Б Специфікація складального кресленника..... | 95 |

Перелік умовних позначень, символів і термінів

РКП – робочий коефіцієнт перетворення, мВ/В;

$U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга, В;

$U_{\text{жив}}$ – напруга живлення, В;

k – коефіцієнт симетрії;

k_T – коефіцієнт тензочутливості;

μ – коефіцієнт Пуассона;

P – сила, Н;

E – модуль пружності (модуль Юнга), ГПа;

\mathcal{E}_0 – відносна деформація;

S – чутливість;

l_0 – база виміру деформацій, мм;

l_1 – база 1-ї ділянки виміру ВД, мм;

l_2 – база 2-ї ділянки виміру ВД, мм;

l_3 – база 3-ї ділянки виміру ВД, мм;

F_1 – площа перерізу 1-ї ділянки, мм²;

F_2 – площа перерізу 2-ї ділянки, мм²;

F_3 – площа перерізу 3-ї ділянки, мм²;

T – стала часу, с;

ξ – коефіцієнт демпфування;

ω_0 – частота власних коливань, Гц;

ω – частота вимушених коливань, Гц;

M – маса пружного елемента, кг;

M_1 – маса деформуючої ділянки, кг;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

t – час, с;

T – час роботи приладу, год;

λ_{i0} - інтенсивність відмов елементів приладів;

a_i – поправочний множник інтенсивності відмов;

P_B – загальна вірогідність відсутності раптових відмов;

$S_{пп}$ – площа перерізу пластини, м²;

P_0 – сила, яка задається, Н;

$E_{п}$ – модуль Юнга матеріалу пластини, ГПа;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 11 |

Вступ

В наш час при проведенні наукових досліджень, керуванні технологічними процесами, торгових операціях виникає необхідність використовувати високоточні вимірювачі фізичних величин. Найбільш поширеним класом вимірювальних перетворювачів являються перетворювачі, які використовують тензорезистивний ефект. В цьому класі перетворювачів вищу точність мають датчики сили, датчики ваги, датчики тиску. В магістерській дисертації розглядається можливість побудови тензометричної системи з механічними підсилювачами для виміру деформації. Всі об'єкти до яких прикладається сила отримують деякі прирощення розмірів, тобто деформацію при розтягу, стиску, або крученні об'єкта. Тому доцільно використовувати вимірювальні перетворювачі відносних деформацій. Їх основною перевагою є малі габарити та маса, точність, надійність та простота використання. Для зручності зняття результатів використовують цифровий підсилювач, за допомогою якого через відповідний йому інтерфейс користувач отримує дані на комп'ютер, або віддалений сервер. Це дозволяє слідкувати за датчиком дистанційно.

Такий датчик може закріплюватись безпосередньо на опорах мостів, опорах будівель з великими прольотами, конструкціях виробничих цехах та будь-яких об'єктах де необхідно вимірювати та контролювати деформацію. При розробці даного тензометричного датчика відносних деформацій було розглянуто декілька аналогів датчиків сили та ваги аналогового типу, та адаптовано їх конструкцію і властивості.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД П171мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 12 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

Для контролю напружено-деформованого стану конструкцій споруд багато фірм пропонують використовувати датчики деформації та ваги. Принцип таких датчиків полягає в вимірюванні величини деформації за допомогою тензорезисторів. Визначення значення деформації об'єкта дослідження здійснюється за допомогою тензорезисторів, підключених в мостову схему. При розтягу об'єкта дослідження вздовж осі чутливості тензорезистори значення опору тензорезистори збільшується на величину пропорційну значенню деформації. Відповідно при стиску об'єкта дослідження значення опору тензорезистора зменшується. Тобто відбувається розбаланс моста.

Розглянемо декілька датчиків деформації, які представлені закордонними фірмами.

1.1 Датчик деформації з аналоговим підсилювачем GEFRAN (Італія) SL76/80-AA



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд датчика SL76/80-AA

Основні функції:

- механічно підсилення деформації між двома монтажними ділянками;
- робота в режимі розтягу;
- наявність аналогового підсилювача;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

- динамічні додатки;
- преси та ливарні машини;
- сталевий корпус із класом захисту IP54.

Тензодатчики захоплюють поверхневий натяг між двома місцями установки. Штам, що виникає між монтажними зонами, механічно посилюється всередині датчика.

Вбудований підсилювач підсилює сигнал на місці. Завдяки міцній конструкції, ці датчики використовуються в важких промислових умовах. У разі перевантаження цей датчик може отримати зміщення[1].

В табл. 1.1 представлено основні характеристики датчика деформації.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|-------------------------|------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Тип тензорезистора | | Фольговий |
| Опір мостової схеми | Ом | 350 |
| Діапазон вимірювання | $\mu\epsilon$ | При розтягу 100...800 |
| | | При стиску -100...-250 |
| Регулювання діапазону | % | ± 15 |
| Регулювання нуля | % | ± 50 |
| Фільтр нижніх частот | Гц | 150 |
| Вихідна напруга | В | 0... ± 10 |
| Шум | мВ | <10 |
| Допуск чутливості | % | ± 1 |
| Точність | % | < ± 1 |
| Точність нульової точки | % | < $\pm 0,5$ |

Продовження табл. 1.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|----|----------|
| Лінійність | % | < ±0,5 |
| Гистерезис | % | < ±0,3 |
| Стабільність | % | < 1 |
| Вихідний опір | Ом | 10 |
| Час скидання | мс | >1 |
| Скидання напруги | В | 0 |
| Напруга живлення | В | 20...28 |
| Струм живлення | мА | < 20 |
| Захист від зворотної полярності | | + |
| Захист від випадкового короткого замикання | | + |
| Діапазон робочих температур | °С | -10...65 |
| Діапазон температур зберігання | °С | -10...65 |
| Температурний коефіцієнт на 10 °С | | < 0,2 |
| Клас захисту | | IP54 |
| Матеріал корпусу | | сталь |
| Матеріал покриття | | алюміній |
| Вага, включаючи кабель | кг | 0,11 |

1.2 Датчик деформації НВМ (Німеччина) SLB-700A/06-1

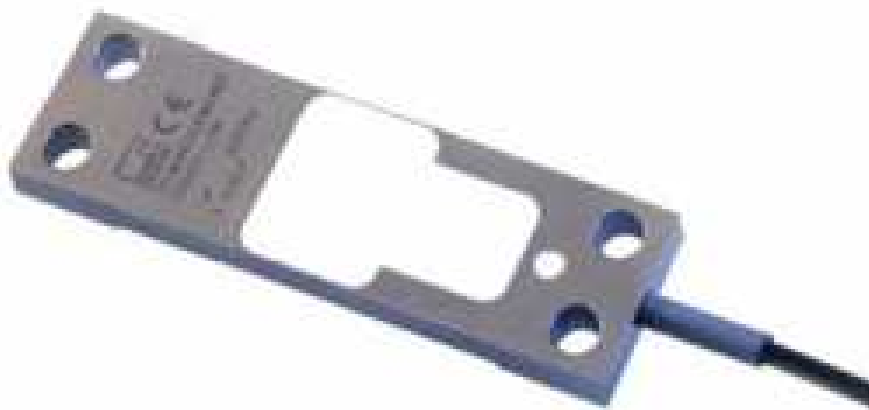


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд датчика SLB-700A/06-1

Особливості:

- для контролю деформації статично та динамічно навантажених компонентів;
- зручний монтаж за допомогою пригвинчування;
- нержавіюча сталь;
- захист від зовнішнього впливу [2].

В табл. 1.2 представлені основні характеристики датчика деформації.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|---|------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Номинальний діапазон вимірювання | мкм/м | 0 ... 500 |
| Номинальна чутливість | мВ/В | 1,5±0,15 |
| Відносна похибка нульового сигналу | % | 5 |
| Відносна реверсивність | % | 0,5 |
| Відносна нелінійність | % | 0,5 |
| Вплив температурна чутливість, на 10 К | % | 0,2 |
| Вплив температури на нуль, на 10 К | % | 0,2 |
| Вихідний опір | Ом | 1000 ± 10 |
| Вхідний опір | Ом | >1000 |
| Опір ізоляції | Ом | >5·10 ¹⁰ |
| Номинальний діапазон напруги живлення | В | 2 ... 15 |
| Номинальний діапазон температур | °С | -10 ... 40 |
| Робочий діапазон температур | °С | -20 ... 60 |
| Діапазон температур зберігання | °С | -40 ... 85 |
| Максимальна робоча деформація | мкм/м | 750 |
| Відновлююча сила | Н | 3110 |
| Деформація на розрив | мкм/м | 1500 |
| Максимально допустиме вібраційне навантаження по VDI/VDE 2638 | % | 150 |
| Вібрація по DIN EN 60068-2-6 | Гц | 10 ... 500 |

Продовження табл. 1.2

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|------------|
| Максимальне ударне навантаження по DIN EN 60068-2-27 | г | 50 |
| Клас захисту по DIN EN 60529 | | IP65 |
| Матеріал оболонки кабелю | | поліуретан |
| Довжина кабелю | м | 6 |

1.3 Датчик ваги Keli Electric Manufacturing (Китай) SEBC-SS



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд датчика SEBC-SS

Розглянемо основні характеристики датчика ваги, які представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|--|------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 |
| Номінальне навантаження | кг | 200 |
| Чутливість (РКП) | мВ/В | 1.0±0.1 |
| Сумарна похибка | % | ±1 |
| Баланс нуля | % | ±2 |
| Температурне відхилення чутливості на 10°C | % | ±0.05 |
| Температурне відхилення нуля | % | ±0.05 |

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

Продовження таблиці 1.3

| 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|-----|-----------|
| Вхідний опір | Ом | 350±10 |
| Вихідний опір | Ом | 352±3 |
| Опір ізоляції | МОм | ≥5000 |
| Діапазон термокомпенсації | °С | -10...+40 |
| Діапазон робочих температур | °С | -30...+70 |
| Допустиме навантаження | % | 120 |
| Навантаження на розрив | % | 150 |
| Рекомендована напруга живлення | В | 10...12 |
| Максимальна напруга живлення | В | 15 |
| Клас захисту | | IP67 |
| Матеріал корпусу | | сталь |
| Кабель (довжина/діаметр) | мм | 12000/4 |

1.4 Датчик ваги Magtrol (США) KG-05

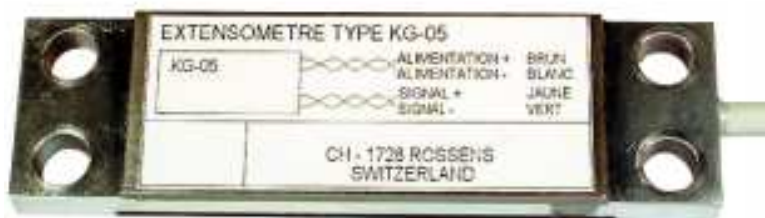


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд датчика KG-05

Особливості:

- температурна компенсація;
- малі габарити;
- міцна конструкція;
- простота монтажу на плоскій поверхні;
- не вимагає технічного обслуговування.

Magtrol KG-05 призначений для вимірювання деформації конструкції або оброблюваної деталі під навантаженням. Через його вихідний сигнал пропорційний прикладеному навантаженню, він може бути використаний як тензодатчик або датчик сили [3].

Основні технічні характеристики датчика ваги представлені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Технічні параметри:

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|----------------------------|------------------|-------------------------|
| Діапазон вимірювання | $\mu\epsilon$ | $\pm 600 \cdot 10^{-6}$ |
| Напрямок сили | | розтяг/стиск |
| Сумарна похибка | % | 1...2 |
| Допустиме перенавантаження | % | 150 |
| Перенавантаження на розрив | % | 500 |
| Опір | Ом | 1000 |
| Робоча температура | °C | -30...+70 |
| Вихідний сигнал | мВ/В | 1.5 |
| Матеріал | | сталь |
| Клас захисту | | IP66 |
| Напруга живлення датчика | В | 5...10 |

Проаналізувавши технічні характеристики цих датчиків деформації та ваги, визначили що всі вони мають аналоговий вихідний сигнал. Для того щоб отримати цифровий сигнал, необхідно підключити датчик до з'єднувальної коробки, яка містить в собі цифровий перетворювач. Використання такого пристрою призведе до зменшення точності. Це пояснюється тим, що необхідні для підключення дроти внесуть додаткові похибки.

Тому виникла задача поєднати в одному приладі механічну, електричну частину та цифровий перетворювач. Це дозволить запобігти виникненню похибок, пов'язаних з втратами опору на додаткових дротах.

Також в таких датчиках недостатньо великий робочий коефіцієнт перетворення, значення якого не перевищує 1,5 мВ/В. Тому виникає задача збільшити цей показник, тим самим підвищити чутливість приладу.

1.5 Вибір складових перетворювача

На точність вимірювання, якість роботи та довговічність приладу великий вплив має вибір компонентів приладу. Необхідно підібрати пристрої за такими характеристиками, щоб в зборі наш прилад не поступався аналогам. Для цього розглянемо деякі основні компоненти цифрового датчика деформації, який побудований на використанні тензOMETричних систем вимірювання.

1.5.1 Вибір матеріалу пружного елемента

Основним конструктивним елементом вимірювального перетворювача деформацій є його пружний елемент. Пружний елемент представлений у вигляді металевої конструкції, яка сприймає деформацію об'єкта вимірювання та механічно підсилює її[4].

Основними матеріалами, з яких виготовляють пружні елементи датчиків деформації та ваги є різні сталі та їх сплави, а також сплави алюмінію.

Матеріали, які використовують для виготовлення пружного елемента датчиків:

- Д16;
- Сталь 40Х;
- Сталь 40ХМ;
- Сталь 42Х2МА;
- Сталь 35ХГСА;
- Прецизійні сплави: 36НХТЮ, 42НХТЮ, 44НХТЮ.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 20 |

Пружний елемент має передавати деформацію об'єкта вимірювання, механічно підсилювати її, повинен мати високі пружні властивості, малі габарити та масу. Для реалізації цих вимог обрано сталь марки 35 ХГСА в якості матеріалу з якого буде виготовлено пружний елемент датчика деформацій.

Сталь марки 35ХГСА відноситься до конструкційної легованої сталі, яка має підвищену міцність та стійкість до значних навантажень.

Хімічний склад сталі 35ХГСА за ГОСТ 4543-71:

- вуглець – 0,32...0,39%;
- хром – 1,1...1,4%;
- марганець 0,8...1,1%;
- кремній – 1,1...1,4%;
- мідь – до 0,3%;
- нікель – до 0,3% [5].

Деталі, виготовлені зі сталі 35ХГСА, мають характеристику стабільності геометричних та пружних характеристик з плином часу та під дією зовнішніх факторів. Сталь 35ХГСА технологічна при механічній та термічній обробці при виготовленні з неї деталей. Густина сталі марки 35ХГСА дорівнює 7850 кг/м^3 , а модуль пружності – 210ГПа, які в подальшому знадобляться при розрахунках

1.5.2 Вибір тензорезисторів

Для вимірювання деформації об'єкта дослідження доцільно використати тензорезистори. Вони більш простіші за принципом роботи, ніж волоконно-оптичні чи п'єзоелементи, а також мають вищу точність при вимірюванні.

Принцип дії тензорезисторів заснований на зміні електричного опору при дії сили, яка деформує об'єкт вимірювання. При дії розтягуючої сили відбувається прирощення довжини об'єкта дослідження і одночасне зменшення

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 21 |

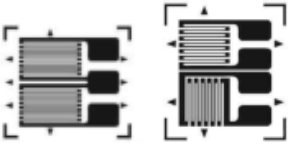
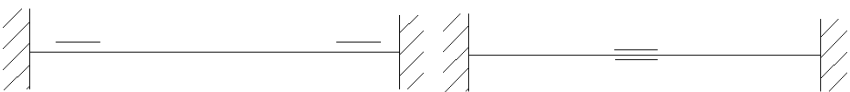


площі поперечного перерізу. Відповідно, при дії стискаючої сили відбувається зменшення довжини об'єкта вимірювання та одночасне збільшення площі поперечного перерізу. Зміни довжини та площі поперечного перерізу тензорезисторів пропорційні зміні об'єкта вимірювання. Отже при розтягу об'єкта вимірювання вздовж осі чутливості тензорезистора електричний опір в тензорезистора збільшується, а при стиску – зменшується[6].

Можуть виникати деякі похибки при вимірюванні не в лабораторних умовах. При зміні температури відбувається зміна значення модуля пружності матеріалу. Тому необхідно в мостову схему підключення тензорезисторів включити окремий резистор компенсації модуля пружності. Це забезпечить надійну компенсацію похибки вимірювання чутливості датчика.

Проте це не знизить температурний дрейф. Тоді було розроблено тензорезистори з одночасною компенсацією модуля пружності та компенсацією температурних похибок.

Тензорезистори виготовляються різноманітної конфігурації, яку користувач обирає в залежності конструкції датчика та їх схеми розташування. Зовнішній вигляд тензорезистора та схема розташування їх на датчику представлені в табл.1.5.

Таблиця 1.5 – Схема розташування тензорезисторів

| Тип тензорезистора | Схема розташування |
|---|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Виходячи зі схеми розташування тензорезисторів на датчику, доцільно обрати тензорезистор фірми ZEMIC (Китай) ВAM350-2ЕВ, який представлено на рис. 1.5.

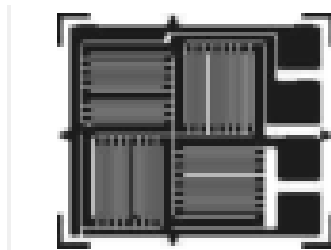


Рисунок 1.5 – Тензорезистор ВAM350-2ЕВ

Такий тензорезистор повністю вологостійкий, має фольгову решітку з константану та підложкою з тонкої поліамідної плівки. Він має функцією компенсації повзучості та термокомпенсації.

Тензорезистор ВAM350-2ЕВ має такі характеристики, як висока здатність до розтягу/стиску, добра термостійкість та широкий температурний діапазон, низька гігроскопічність, добрі властивості по компенсації повзучості та виходу на нуль. Перш за все вони призначені для високоточних перетворювачів класу точності С3 та вище[7].

Технічні характеристики тензорезистора представлені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики

| Характеристика | | Фізична величина | Значення |
|--|---------|------------------|-----------------|
| Номінальний опір | | Ом | 350 |
| Допустиме відхилення від середнього значення опору | | % | <0,1 |
| Робочий коефіцієнт перетворення | | мВ/В | 2...2,2 |
| Максимальна деформація | | % | 2,5 |
| Надійність | | | 10 ⁷ |
| Діапазон робочих температур | | °С | -30...+80 |
| Розміри тензорешітки | довжина | мм | 2,3 |
| | ширина | | 2,7 |
| Розміри підложки | довжина | мм | 8,6 |
| | ширина | | 7,2 |

Тензорезистор ВAM350-2ЕВ клеїться на добре оброблену та знежирену поверхню клеєм Н-610А ISO 15166-1:1998.

Н-610А – двухкомпонентний вискоєфективний клей з епоксидної смоли. Серед переваг можна виділити невелику повзучість, низький гістерезис, широкий температурний діапазон охоплення, низьку в'язкість та широкий діапазон робочих температур, крім того необхідно відмітити не проводити попередню прогріттю, а також швидку та зручну процедуру наклеювання тензорезисторів.

Температурний діапазон: в довгостроковому періоді $-269^{\circ}\text{C} \dots +260^{\circ}\text{C}$, в короткостроковому - $269^{\circ}\text{C} \dots +370^{\circ}\text{C}$ [8].

1.5.3. Вибір цифрового електронного підсилювача

Для зручності зняття показань необхідно перетворити аналоговий вихідний сигнал в цифровий. Для того щоб уникнути похибки, яка може виникнути при використанні зовнішнього АЦП доцільно використати електронний підсилювач, який буде кріпитись безпосередньо на датчику.

В якості цифрового вимірювального перетворювача обрано цифровий електронний підсилювач фірми НВМ (Німеччина) AD 105.

На рис.1.6 представлено зовнішній вигляд цифрового електронного підсилювача AD 105.

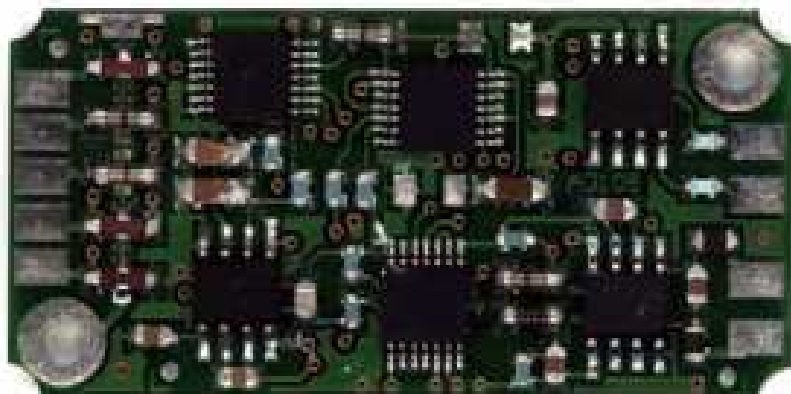


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд цифрового електронного підсилювача AD 105.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

Характерні особливості:

- послідовний інтерфейс RS-485 2-х провідний полудуплексний;
- цифрова фільтрація і масштабування вимірювального сигналу;
- зв'язок за допомогою ASCII команд;
- 1 пороговий перемикач з гістерезисом;
- індикатор живлення/стану;
- програма для ПК для встановлення параметрів;
- напруга 6...15В постійного струму;
- РКП 2,1 мВ/В;
- Розміри 45x22,5x7 мм.

Механічна конструкція представляє собою печатну плату. З'єднання для моста перетворювача, а також для живлення і інтерфейсу забезпечують паяльні колодки. AD 105 можливо встановити ззовні тензодатчика, або безпосередньо на стороні тензодатчика. Для монтажу на тензодатчику можливе використання захисного наконечника для заземлення.

Як правило, продукт не представляє жодної небезпеки, Монтаж та ввід в експлуатацію може виконуватись виключно кваліфікованим персоналом. Не допускається потрапляння бруду і вологи всередину пристрою. При підключенні ліній приймаються міри проти електростатичних розрядів, які можуть призвести до поламки електроніки. Для живлення необхідна невелика напруга з безпечним відключенням від мережі [9].

Технічні характеристики цифрового електронного підсилювача AD 105 наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|-------------------------------------|------------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Точність при > 1 мкВ/діл | діл | 3000 |
| Опір моста | Ом | >300 |
| Напруга живлення моста | В | 5 (зм. струм) |
| Максимальний вимірювальний діапазон | мВ/В | ±2,4 |

Продовження таблиці 1.7

| 1 | 2 | 3 | |
|---|-------------|---------------------------------|-----------|
| Чутливість | мВ/В | 2 | |
| Максимальна роздільна здатність сигналу | бит | ±20(при 1 Гц) | |
| Швидкість вимірювання | Гц | 100,5,25,12,6,3,2,1 | |
| Частота зрізу цифрового фільтру | Гц | 8...0,005 | |
| Довжина кабелю | м | <1000 | |
| Нелінійність | % | ±0,0025 | |
| Температурне відхилення | | | |
| точки нуля | | ±0,002 | |
| чутливості | | ±0,005 | |
| Швидкість обміну | бод | 1200,2400,4800,9600,19200,38400 | |
| Максимальна напруга на виході | В | 15 | |
| Максимальний струм на виході | мА | 40 (при 68), 22 (при 158) | |
| Робоча напруга (постійний струм) | В | 6 -15 | |
| Струм споживання | мА | ≤45 | |
| Температурні діапазони | номінальний | °С | -10...+40 |
| | робочий | | -10...+50 |
| | зберігання | | -25...+75 |
| Клас захисту | | IP00 | |
| Вага | г | 50 | |

1.5.4. Вибір інтерфейсу передачі даних

Для зручного передавання даних від датчика до користувача необхідно використовувати інтерфейс передачі даних. Оскільки, обраний в попередньому пункті, цифровий підсилювач синхронізується з інтерфейсом RS485, то й обрано було даний інтерфейс.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

Інтерфейс RS485 на сьогоднішній день є найбільш широко використовуваним промисловим стандартом, а це означає що сама по собі кількість підключених пристроїв потребує швидкого та ефективного налагоджуваного інструменту . Передача даних відбувається по двопровідному напівдуплексному багато точковому послідовно симетричному канал зв'язку. Послідовний безперервний потік даних передається тільки в одну сторону. Використовується вита пара, за якої симетричний канал значно підвищує стійкість сигналу до синфазних шумів та добре пригнічує електромагнітне випромінювання, яке створює корисний сигнал.

В табл. 1.8 представлено технічні характеристики інтерфейсу RS485.

Таблиця 1.8 – Технічні характеристики

| Характеристика | Фізична величина | Значення |
|---|------------------|-----------|
| Допустима кількість драйверів | | 32 |
| Максимальна довжина лінії зв'язку | м | 1200 |
| Максимальна швидкість передачі | Мбит/с | 10 |
| Мінімальний вихідний сигнал драйвера | В | $\pm 1,5$ |
| Максимальний вихідний сигнал драйвера | В | ± 5 |
| Максимальний струм короткого замикання драйвера | мА | 250 |
| Вихідний опір драйвера | Ом | 54 |
| Вхідний опір драйвера | кОм | 12 |
| Допустимий сумарний вхідний опір | Ом | 375 |
| Діапазон нечутливості до сигналу | мВ | ± 200 |
| Рівень логічної одиниці | мВ | $> +200$ |
| Рівень логічного нуля | мВ | < -200 |

Переваги:

- добра завадостійкість;
- велика дальність зв'язку;
- одно полярне живлення +5В;
- проста реалізація драйверів;

- можливість широкомовної передачі;
- багатоточкове з'єднання.

Недоліки:

- велике споживання напруги;
- відсутність сервісних сигналів;
- можливість виникнення колізій.

Сам RS485 перетворює вхідну послідовність «1» та «0» в диференційований сигнал, передає його в симетричну лінію зв'язку. Підключає чи відключає передатчик драйвера по сигналу вищого протоколу(наприклад RS-232), приймає диференційований сигнал з лінії зв'язку[10].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 28 |

2 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ВІДНОСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

2.1 Схема передачі величини деформації

Для вимірювання відносної деформації створено цифровий вимірювальний перетворювач відносних деформацій з механічними підсилювачами. Далі наведено опис вимірювача, розрахунки його параметрів та метрологічних характеристик.

2.1.1 Опис тензометричного датчика відносних деформацій

Тензометричний датчик деформацій представляє собою пружний елемент, який закріплюється на об'єкті що досліджується. На одній стороні приклеєні тензорезистори, що з'єднані з прецизійним підсилювачем з іншої сторони. Деформація об'єкта вимірювання передається на пружний елемент. При розтягу об'єкту опір тензорезисторів збільшується і видається сигнал пропорційний цій зміні. При стиску об'єкта опір тензорезисторів зменшується. Сигнал передається через екранований кабель через інтерфейс на пристрій для виведення інформації (комп'ютер).

Якщо поверхня досліджуваного об'єкта не дозволяє закріпити датчик безпосередньо на болтах до об'єкту (не дозволяється робити отвори в об'єкті, або поверхня не ідеальна), тоді рекомендується використовувати допоміжні бабишки. Бабишки мають приварюватися до об'єкту, і вже до них прикручується датчик. Надійне зчеплення поверхонь відбувається за рахунок сил тертя.

Для запобігання пошкодження електронної частини датчика прецизійний підсилювач закривається кришкою, яка в водночас слугує екраном від статичної електрики і захищає від вологи[4].

Діапазон робочих температур датчика: $-10^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 29 |

Максимально допустимі деформації: $\pm 3 \cdot 10^{-3}$;

Діапазон відносних похибок не більше: $\pm 2,5\%$;

Габарити, не більше, мм: 10x90x30;

Маса, не більше, кг: 0,2.

2.1.2 Електрична схема підключення тензорезисторів

Для отримання більш точних результатів вимірювання деформації доцільно використати 6-ти провідникову схему підключення в міст Уінстона (рис. 2.1). В такому виконанні вимірювальний міст не сприймає температурні зміни в тензорезисторах, які приклеєні на датчик, та температурну зміну опорів з'єднувальних проводів, за умови, що всі провода ідентичні. Введення ланцюга, який вимірює напругу живлення моста, з використанням АЦП дозволить збільшити точність вимірювання[11].

Використовуючи повномостову схему підключення тензорезисторів визначимо мінімальну площу та товщину перерізу ділянки, де будуть розташовуватись тензорезистори.

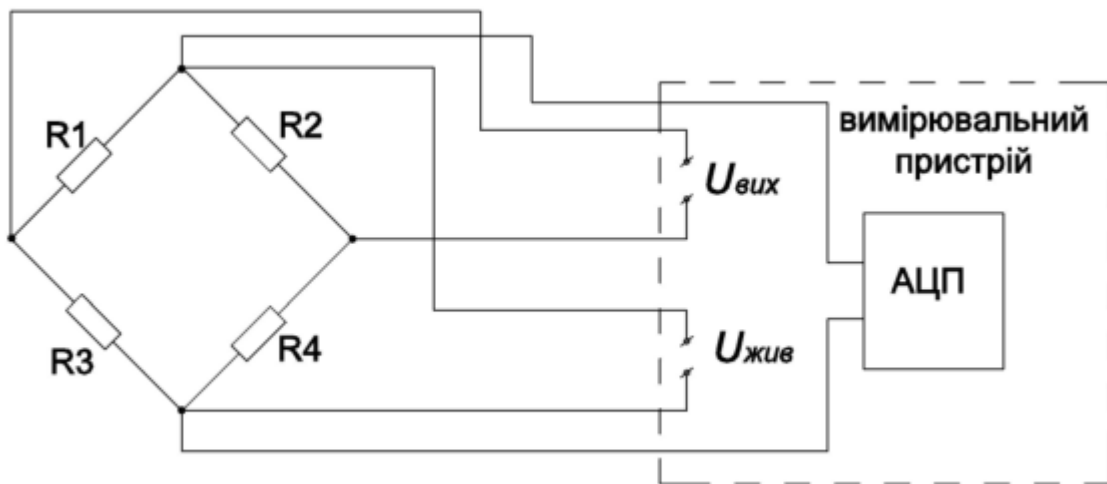


Рисунок 2.1 – Електрична схема підключення тензорезисторів

На електричній схемі позначено:

R_1, R_4 – опори тензорезисторів, які вимірюють розтяг об'єкта;

R_2, R_3 – опори тензорезисторів, які вимірюють стиск об'єкта;

Розрахуємо мостову схему підключення тензорезисторів з термокомпенсуючими опорами.

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} = \frac{k}{(k+1)^2} * \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right); \quad (2.1)$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} * \frac{k}{(k+1)^2} * \kappa_T * \left(\frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_4}{l_4} - \frac{\Delta l_2}{l_2} - \frac{\Delta l_3}{l_3} \right); \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{\Delta l_4}{l_4} = \varepsilon_0; \quad (2.3)$$

$$\frac{\Delta l_2}{l_3} = \frac{\Delta l_3}{l_3} = -\mu * \varepsilon_0. \quad (2.4)$$

Тоді вихідна напруга буде дорівнювати:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} * \frac{k}{(k+1)^2} * \kappa_T * 2(1+\mu) * \varepsilon_0; \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{P}{F_{\text{пер}} * E}; \quad (2.6)$$

$$PKП = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}} = \frac{k}{(k+1)^2} * \kappa_T * 2(1+\mu) * \frac{P}{E * F_{\text{сеч}}}. \quad (2.7)$$

Розрахунковим параметром буде площа перерізу ділянки, до якої будуть приклеєні тензорезистори $S_{\text{пер}}$, буде дорівнювати:

$$F_{\text{пер}} = \frac{k}{(k+1)^2} * \kappa_T * 2(1+\mu) * \frac{P}{E * PKП}, \quad (8)$$

де k - коефіцієнт симетрії мостової схеми;

κ_T - коефіцієнт тензочутливості;

μ - коефіцієнт Пуассона;

P – максимально допустима сила, Н;

E – модуль пружності, ГПа;

$PKП$ – робочий коефіцієнт перетворення, мВ/В;

$F_{\text{пер}}$ – площа поперечного перерізу, м².

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 31 |

Для сталі 35ХГСА дані параметри будуть мати такі значення:

$$k=1; \quad k_T=2,1; \quad \mu=0,3;$$
$$P=5,5 \cdot 10^3 \text{ (Н)}; \quad E=210 \text{ (ГПа)}; \quad РКП=2 \text{ (мВ/В)}.$$

Підставивши у формулу (8) значення параметрів визначимо чисельне значення площі поперечного перерізу ділянки на якій приклеюються тензорезистори.

$$F_{пер} = \frac{1}{(1+1)^2} * 2,1 * 2(1+0,3) * \frac{5,5 * 10^3}{210 * 10^9 * 2 * 10^{-3}} = 17,8(\text{мм}^2).$$

Отже площа перерізу ділянки на якій будуть приклеєні тензорезистори дорівнює 17,8 мм² і є мінімальною для цього датчика. Тобто мінімальна товщина пружного елемента на цій ділянці буде 1,5 мм.

2.1.3 Структурна схема тензометричного датчика відносних деформацій

Для оцінки ефективності застосування механічного підсилення необхідно провести аналіз чутливості пружного елемента до сприймання відносної деформації. Для визначення чутливості пружного елемента датчика деформацій необхідно визначити принцип передавання деформації від об'єкта вимірювання на пружний елемент. Для цього було умовно розділено пружний елемент на три частини та визначено габаритні характеристики поперечних перерізів на цих ділянках. Умовні позначення ділянок поперечних перерізів та габаритних розмірів зображено на рис. 2.2.

Як видно з рисунку, в конструкції пружного елемента присутня ділянка I яка найбільше деформується при його розтягу-стиску. Це відбувається за рахунок того, що площа поперечного перерізу даної ділянки найменша на всій площині вимірювання. Саме на ділянку I слід наклеювати тензорезистори.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

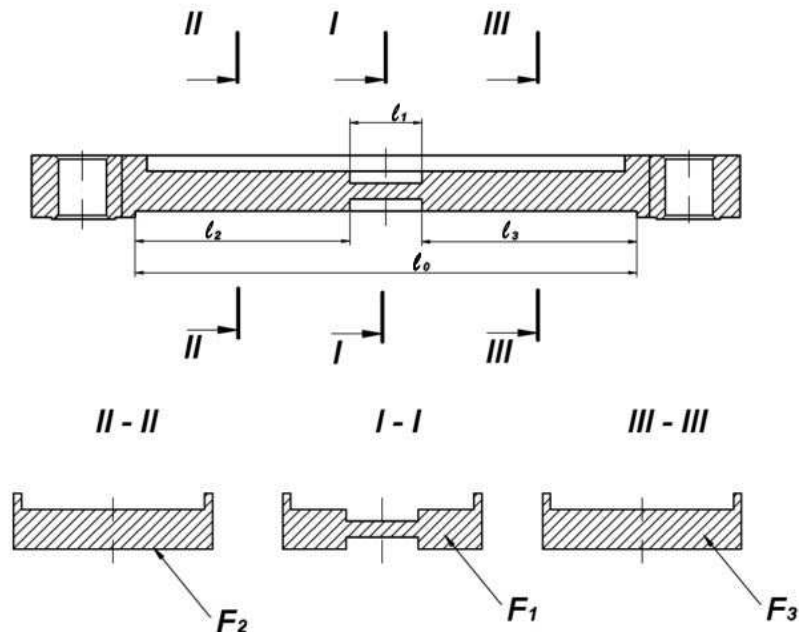


Рисунок 2.2 – Умовні позначення ділянок поперечних перерізів

Для визначення загальної чутливості цифрового вимірювального перетворювача відносних деформацій з механічним підсилювачем побудуємо структурну схему з зворотнім зв'язком (рис. 2.3) та оцінимо вплив на її величину геометричних параметрів кожної з ділянок, параметрів мостової схеми та параметрів цифрового підсилювача [4].

Структурна схема перетворювача представлена на рис.2.3.

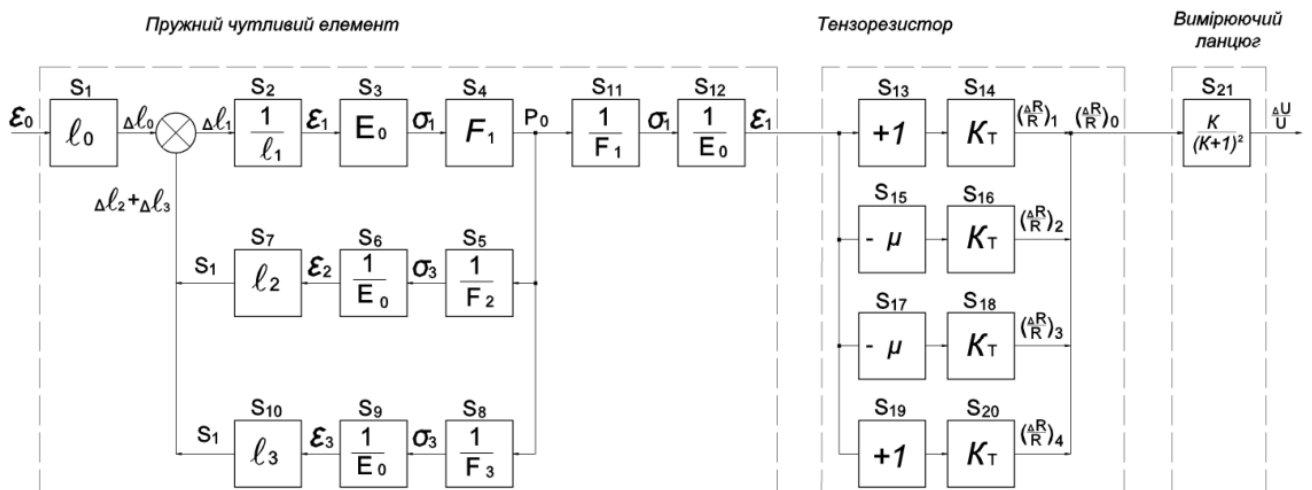


Рисунок 2.3 – Структурна схема цифрового вимірювального перетворювача відносних деформацій

За структурною схемою можна визначити загальну чутливість перетворювача.

$$\frac{\Delta U}{U} = S_0 * \epsilon_0 \quad (2.9)$$

Чутливість пружного чутливого елемента буде дорівнювати:

$$S_{нче} = S_1 * \frac{S_2 * S_3 * S_4}{1 + S_2 * S_3 * S_4 * (S_5 * S_6 * S_7 + S_8 * S_9 * S_{10})} * S_{11} * S_{12}. \quad (2.10)$$

Підставивши формульні значення чутливостей отримуємо:

$$S_{нче} = \ell_0 * \frac{\frac{E * F_1 * 1}{\ell_1 * F_1 * E}}{1 + \frac{E * F_1 * (\frac{\ell_2}{E * F_2} + \frac{\ell_3}{E * F_3})}{\ell_1}} = \frac{\ell_0 * 1}{\ell_1 * (1 + \frac{\ell_2 * F_1}{\ell_1 * F_2} + \frac{\ell_3 * F_1}{\ell_1 * F_3})}, \quad (2.11)$$

де ℓ_0 – база виміру деформацій;

ℓ_1 – база 1-ї ділянки виміру;

ℓ_2 – база 2-ї ділянки виміру;

ℓ_3 – база 3-ї ділянки виміру;

F_1 – площа поперечного перерізу 1-ї ділянки;

F_2 – площа поперечного перерізу 2-ї ділянки;

F_3 – площа поперечного перерізу 3-ї ділянки.

Числові значення параметрів дорівнюють:

$$\ell_0 = 63(\text{мм}); \quad \ell_1 = 8(\text{мм}); \quad \ell_2 = 26,5(\text{мм}); \quad \ell_3 = 26,5(\text{мм});$$

$$F_1 = 87(\text{мм}^2); \quad F_2 = 129(\text{мм}^2); \quad F_3 = 129(\text{мм}^2).$$

Підставивши їх у формулу (2.11) отримаємо:

$$S_{нче} = \frac{63}{8} * \frac{1}{1 + \frac{26,5}{8} * \frac{87}{129} + \frac{26,5}{8} * \frac{87}{129}} = 1,44.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 34 |

Тепер визначимо чутливість тензорезистора, за структурною схемою. Оскільки блоки структурної схеми з'єднані паралельно, то чутливість буде дорівнювати:

$$S_T = 1 * k_T - \mu * k_T - \mu * k_T + 1 * k_T = 2 * k_T * (1 + \mu) \quad (2.12)$$

Підставивши числові значення $k_T=2,1$; $\mu=0,3$ отримаємо:

$$S_T = 2,1 * 2(1 + 0,3) = 5,46.$$

Чутливість вимірювального ланцюга буде дорівнювати:

$$S_{вл} = \frac{k}{(k+1)^2}. \quad (2.13)$$

$$S_{вл} = \frac{1}{(1+1)^2} = 0,25.$$

За структурною схемою загальна чутливість буде дорівнювати:

$$S_0 = S_{нче} * S_T * S_{вл}. \quad (2.14)$$

Підставивши отримані вище значення у формулу (2.14) отримуємо:

$$S_0 = 1,44 * 5,46 * 0,25 = 1,965.$$

Отже, за структурною схемою вихідний сигнал буде обчислюватись за формулою:

$$\frac{U_{вих}}{U_{жив}} = \frac{l_0}{l_1} * \frac{1}{1 + \frac{l_2}{l_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{l_3}{l_1} * \frac{F_1}{F_3}} * \frac{k}{(k+1)^2} * k_T * \epsilon_0. \quad (2.15)$$

Використання конструктивно допустимих геометричних параметрів пружного елемента, параметрів мостової схеми та параметрів цифрового підсилювача в конструкції цифрового вимірювального перетворювача дає можливість механічно підсилити деформацію в 1,96 раз, що підвищить точність вимірювання відносної деформації. Виходячи з рівняння чутливості пружного елемента можна зробити висновок, що матеріал пружного елемента не впливає на розмір чутливості вимірювання відносних деформацій. Проте вибір

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 35 |

матеріалу необхідно робити за його механічними характеристикам, врахувавши умови експлуатації та діапазон вимірювальних величин.

2.2 Метрологічний аналіз характеристик досліджуваного засобу вимірювальної техніки

2.2.1 Розрахунок надійності

Аналізуючи схему та конструкцію будь якого приладу (датчика), можливо виділити n простих елементів, раптова відмова будь-якого з них призведе до раптової відмови всього приладу. Тоді умовою безвідмовної роботи буде відсутність раптових відмов у всіх без винятку елементів.

Для типових елементів дані про інтенсивність відмов (λ – характеристики) приводяться в спеціальних довідкових таблицях (табл.2.1) або графіках, які складені на основі статистичних випробувань великих партій елементів.

Приведені значення є наближеними, так як елементи одної і тієї ж назви можуть суттєво відрізнятись за конструкцією, а отже і мати різну надійність.

Вірогідність відсутності раптових відмов визначається за формулою:

$$P_i = e^{-\lambda_{i0} a_i t}, \quad (2.16)$$

де λ_{i0} – інтенсивність відмов елементів приладів;

a_i – поправочний множник;

t – час роботи[12].

Загальна вірогідність відсутності раптових відмов визначається за формулами:

$$P_e = e^{-\lambda t}; \quad (2.17)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n m_i * \lambda_{0i} * a_i. \quad (2.18)$$

Таблиця 2.1– Вихідні дані для розрахунку надійності

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 36 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

| № | Назва | m | $\lambda_{io} * 10^{-6}, (1/\text{год})$ | a_j | $m * a_j * \lambda_{io} * 10^{-6}$ |
|---|---------------|-----|--|-------|------------------------------------|
| 1 | Тензорезистор | 4 | 1.79 | 1.5 | 10,72 |
| 2 | Роз'єм | 1 | 0,4 | 1.2 | 0,48 |
| 3 | Плата | 1 | 0,23 | 1.1 | 0,253 |
| 4 | Кабель | 1 | 0,127 | 1 | 0,127 |
| 5 | Шлейф | 1 | 0,127 | 1 | 0,127 |
| 6 | Пайка | 2 | 0,13 | 1.2 | 0,304 |

Для приладобудування час роботи $t=2000$ (год).

$$\lambda = (1,074 + 0,0048 + 0,0253 + 0,00127 + 0,00127 + 0,00156) * 10^{-6} = 12,011 * 10^{-6}$$

$$P_g = e^{-12,011 * 10^{-6} * 2000} = 0,97.$$

Отже вірогідність відсутності раптових відмов приладу становить 0.97, що є допустимим. Прилад можна вважати надійним.

2.2.2 Розрахунок абсолютної та відносної похибки вимірювання

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної фізичної величини.

Похибки поділяють на абсолютну похибку вимірювання та відносну похибку вимірювання. Абсолютна похибка вимірювання визначається в одиницях вимірювальної величини та чисельно дорівнює різниці виміряного значення та такого, що приймається за істинне. Відносна похибка вимірювання є відношенням абсолютної похибки до його номінального значення, та зазвичай виражається в відсотках.

Для початку необхідно визначити абсолютну похибку вимірювання вихідного параметра $U_{вих}$.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 37 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Номинальне значення вихідного параметра $U_{вих}$ даного приладу визначається за формулою:

$$A = U_{вих} = U_{жив} * \frac{k}{(k+1)^2} * k_T * 2(1+\mu) * \frac{\ell_0}{\ell_1} * \frac{\varepsilon_{max}}{1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} \cdot \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} \cdot \frac{F_1}{F_3}}; \quad (2.19)$$

$$A = 12 * \frac{1}{(1+1)^2} * 2,1 * 2(1+0,3) * \frac{63}{8} * \frac{\pm 3 * 10^{-3}}{1 + \frac{26,5}{8} \cdot \frac{87}{129} + \frac{26,5}{8} \cdot \frac{87}{129}} = \pm 0,071(B).$$

Вихідна величина є функцією декількох параметрів:

$$A = f(k, k_T, \mu, \ell_0, \ell_1, \ell_2, \ell_3, F_1, F_2, F_3, U_{жив}) \quad (2.20)$$

Чисельні значення параметрів та їх абсолютних відхилень дорівнюють:

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| $k = 1;$ | $\Delta k = 0,01;$ |
| $k_T = 2,1;$ | $\Delta k_T = 0,02;$ |
| $\mu = 0,3;$ | $\Delta \mu = 0,01;$ |
| $\ell_0 = 63\text{мм};$ | $\Delta \ell_0 = 0,2\text{мм};$ |
| $\ell_1 = 8\text{мм};$ | $\Delta \ell_1 = 0,05\text{мм};$ |
| $\ell_2 = 26,5\text{мм};$ | $\Delta \ell_2 = 0,01\text{мм};$ |
| $\ell_3 = 26,5\text{мм};$ | $\Delta \ell_3 = 0,01\text{мм};$ |
| $F_1 = 87\text{мм}^2;$ | $\Delta F_1 = 0,2\text{мм}^2;$ |
| $F_2 = 129\text{мм}^2;$ | $\Delta F_2 = 0,2\text{мм}^2;$ |
| $F_3 = 129\text{мм}^2;$ | $\Delta F_3 = 0,2\text{мм}^2;$ |
| $U_{жив} = 12\text{В};$ | $U_{жив} = 0,4\text{В}.$ |

Виходячи з цих значень параметрів визначено абсолютну похибку вихідного параметра, яка визначається за формулами:

$$\Delta U_{вих} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (\alpha_i^2 \cdot \Delta i^2)}, \quad (2.21)$$

$$\alpha_i = \frac{\partial A}{\partial i}, \quad (2.22)$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 38 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

де α_i - коефіцієнти впливу 1-го роду,

$i = k, k_E, \mu, \ell_0, \ell_1, \ell_2, \ell_3, F_1, F_2, F_3, U_{жив}$.

Коефіцієнти впливу 1-го роду для всіх параметрів будуть дорівнювати:

$$\alpha_k = \frac{\partial A}{\partial k} = \frac{1-k}{1+k} * \frac{A}{k} = 0(B);$$

$$\alpha_{k_T} = \frac{\partial A}{\partial k_T} = \frac{A}{k_T} = 337 * 10^{-4} (B);$$

$$\alpha_\mu = \frac{\partial A}{\partial \mu} = \frac{A}{1+\mu} = 544,39 * 10^{-4} (B);$$

$$\alpha_{\ell_0} = \frac{\partial A}{\partial \ell_0} = \frac{A}{\ell_0} = 11,23 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм}\right);$$

$$\alpha_{\ell_1} = \frac{\partial A}{\partial \ell_1} = -\frac{A}{\ell_1 + \frac{\ell_2 * F_1}{F_2} + \frac{\ell_3 * F_1}{F_3}} = -16,17 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм}\right);$$

$$\alpha_{\ell_2} = \frac{\partial A}{\partial \ell_2} = -\frac{A * \frac{1}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2}}{\left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}\right)} = -10,91 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм}\right);$$

$$\alpha_{\ell_3} = \frac{\partial A}{\partial \ell_3} = -\frac{A * \frac{1}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}}{\left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}\right)} = -10,91 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм}\right);$$

$$\alpha_{F_1} = \frac{\partial A}{\partial F_1} = -\frac{A * \left(\frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{1}{F_3}\right)}{\left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}\right)} = -6,64 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм^2}\right);$$

$$\alpha_{F_2} = \frac{\partial A}{\partial F_2} = \frac{A * \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2^2}}{\left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}\right)} = 2,24 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм^2}\right);$$

$$\alpha_{F_3} = \frac{\partial A}{\partial F_3} = \frac{A * \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_2}{F_3^2}}{\left(1 + \frac{\ell_2}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{\ell_3}{\ell_1} * \frac{F_1}{F_3}\right)^2} = 2,24 * 10^{-4} \left(\frac{B}{мм^2}\right);$$

$$\alpha_{U_{жив}} = \frac{\partial A}{\partial U_{жив}} = \frac{A}{U_{жив}} = 58,97 * 10^{-4}.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

Підставивши значення у формулу (2.21) визначимо абсолютну похибку, яка буде дорівнювати:

$$(\Delta U_{вих})^2 = 0^2 \cdot (0,01)^2 + (337 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,02)^2 + (544,39 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,01)^2 + \\ + (11,23 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,2)^2 + (16,17 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,05)^2 + (10,91 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,01)^2 + \\ + (10,91 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,01)^2 + (6,64 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,2)^2 + (2,24 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,2)^2 + \\ + (2,24 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,2)^2 + (58,97 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (0,4)^2 = 6,385 \cdot 10^{-6} (B^2);$$

$$\Delta U_{вих} = 2,529 \cdot 10^{-3} (B) = 2,529 (mB).$$

Отже абсолютна похибка для вихідної напруги $U_{вих}=71(mB)$ при $\varepsilon_{max} = 3 \cdot 10^{-3}$ буде складати $2,52(mB)$.

Після визначення абсолютної похибки вимірювання необхідно визначити відносну похибку вимірювання.

Величини допусків параметрів визначаються за формулами:

$$\delta_i = \frac{\alpha_i \cdot \Delta i}{A} \quad (2.23)$$

$$\delta_k = \frac{\alpha_k \cdot \Delta k}{A} = 0;$$

$$\delta_{\ell_2} = \frac{\alpha_{\ell_2} \cdot \Delta \ell_2}{A} = -1,542 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{\kappa_m} = \frac{\alpha_{\kappa_T} \cdot \Delta \kappa_T}{A} = 95,29 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{\ell_3} = \frac{\alpha_{\ell_3} \cdot \Delta \ell_3}{A} = -1,542 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{\mu} = \frac{\alpha_{\mu} \cdot \Delta \mu}{A} = 76,92 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{F_1} = \frac{\alpha_{F_1} \cdot \Delta F_1}{A} = -18,78 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{\ell_0} = \frac{\alpha_{\ell_0} \cdot \Delta \ell_0}{A} = 31,75 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{F_2} = \frac{\alpha_{F_2} \cdot \Delta F_2}{A} = 6,334 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{\ell_1} = \frac{\alpha_{\ell_1} \cdot \Delta \ell_1}{A} = -11,43 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_{F_3} = \frac{\alpha_{F_3} \cdot \Delta F_3}{A} = 6,334 \cdot 10^{-4};$$

$$\delta_U = \frac{\alpha_U \cdot \Delta U}{A} = 330 \cdot 10^{-4}.$$

Сумарне відхилення визначається за формулою:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} \delta_i^2} \quad (2.24)$$

$$\delta^2 = (10^{-4})^2 \cdot [0 + (95,29)^2 + (76,92)^2 + (31,75)^2 + (11,43)^2 + (1,542)^2 + (1,542)^2 + \\ + (18,78)^2 + (6,334)^2 + (6,334)^2 + 330^2] = 12,77 \cdot 10^{-4}$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

$$\delta = \sqrt{12,77 * 10^{-4}} = 0,0357 = 3,57\%$$

Для довірчої ймовірності, яка дорівнює $P=95\%=0,95$ буде здійснюватись перехід значень через $\pm 3\sigma$ ($t=2$).

$$\sigma_i = \frac{\delta_i}{3} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{\kappa_m} = \frac{95,29 * 10^{-4}}{3} = 31,75 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{\ell_3} = \frac{-1,542 * 10^{-4}}{3} = -0,513 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{\mu} = \frac{76,92 * 10^{-4}}{3} = 25,64 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{F_1} = \frac{-18,78 * 10^{-4}}{3} = -6,261 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{\ell_0} = \frac{31,75 * 10^{-4}}{3} = 10,58 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{F_2} = \frac{6,334 * 10^{-4}}{3} = 2,111 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{\ell_1} = \frac{-11,43 * 10^{-4}}{3} = -3,81 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{F_3} = \frac{6,334 * 10^{-4}}{3} = 2,111 * 10^{-4};$$

$$\sigma_{\ell_2} = \frac{-1,542 * 10^{-4}}{3} = -0,513 * 10^{-4};$$

$$\sigma_U = \frac{330 * 10^{-4}}{3} = 110 * 10^{-4};$$

Сумарне квадратичне відхилення визначається за формулою:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (2.26)$$

Підставивши отримані числові значення у формулу (2.26) отримаємо:

$$\sigma_0^2 = (10^{-4})^2 * [(31,75)^2 + (25,64)^2 + (10,58)^2 + (3,81)^2 + (0,513)^2 + (0,513)^2 + (6,261)^2 + (2,111)^2 + (2,111)^2 + 110^2] = 1,419 * 10^{-4}$$

$$\sigma_0 = \sqrt{1,419 * 10^{-4}} = 0,0121 = 1,2\%$$

Остаточний вигляд вихідного параметра $U_{вих}$ визначається за формулою:

$$U_{вих} = U_{вих} \pm t\sigma_0; \quad (2.27)$$

$$U_{вих} = 0,071(B) \pm 2,4\%$$

Отже відносна похибка вихідного сигналу $U_{вих} = 71(mB)$ при $\varepsilon_{\max} = 3 * 10^{-3}$ буде складати 2,4%, що задовольняє умови завдання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 41 |

2.2.3 Статична характеристика

Статичною характеристикою перетворювача називають функціональну залежність вихідного сигналу від сигналу на вході, при сталому значенні вихідного сигналу (рис. 2.4).

$$\frac{U_{вих}}{U_{жив}} = f(\varepsilon) \quad (2.26)$$

Рівняння (2.26) характеризує стан рівноваги чутливого елемента і дає можливість проаналізувати статичну точність системи в урівноваженому стані.

Для тензометричного перетворювача вхідною величиною є деформація ε , а вихідною – сигнал $\frac{U_{вих}}{U_{жив}}$.

Функція вимірювального ланцюга тензометричного перетворювача має наступний вигляд:

$$\frac{U_{вих}}{U_{жив}} = \frac{l_0}{l_1} * \frac{1}{1 + \frac{l_2}{l_1} * \frac{F_1}{F_2} + \frac{l_3}{l_1} * \frac{F_1}{F_3}} * \frac{k}{(k+1)^2} * k_T * \varepsilon. \quad (2.27)$$

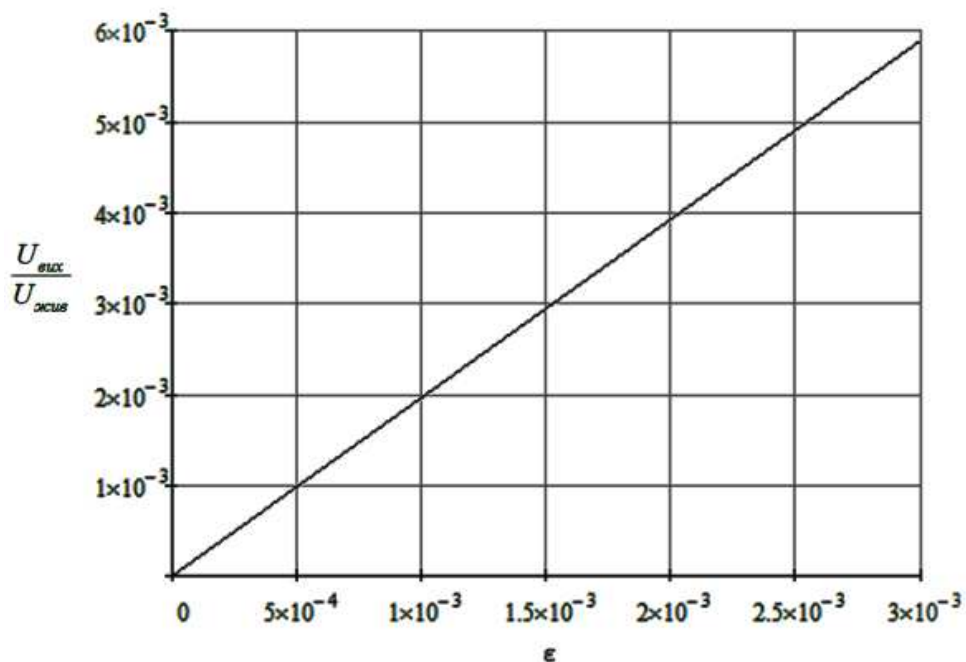


Рисунок 2.4 – Статична характеристика перетворювача

Також використовуючи ці дані можна дослідити вихідний сигнал в залежності від модуля Юнга.

На рис. 2.5 показана лінійна залежність параметру $\frac{U_{вих}}{U_{жив}}$ від деформації, яка залежить від модуля Юнга різного матеріалу:

- 35ХГСА ($E=210 \cdot 10^9$ Па);
- Д16Т ($E=72 \cdot 10^9$ Па);
- Бронза ($E=115 \cdot 10^9$ Па);
- Латунь ($E=90 \cdot 10^9$ Па);
- 36НХТЮ ($E=130 \cdot 10^9$ Па).

$$\frac{U_{вих}}{U_{жив}} = \frac{\ell_0}{\ell_1} * \frac{1}{1 + \frac{\ell_2 * F_1}{\ell_1 * F_2} + \frac{\ell_3 * F_1}{\ell_1 * F_3}} * \frac{k}{(k+1)^2} * k_T * \frac{P}{E * F_1}. \quad (2.26)$$

Підставивши у формулу (2.26) послідовно значення модуля Юнга отримаємо відповідні їм значення $\frac{U_{вих}}{U_{жив}}$ (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Залежність вихідного сигналу від модуля пружності

| № | Матеріал | $E \cdot 10^9$, Па | $\frac{U_{вих}}{U_{жив}} * 10^{-4}$ | $\varepsilon * 10^{-4}$ |
|---|----------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | Д16Т | 72 | 12,46 | 7,489 |
| 2 | Латунь | 90 | 9,966 | 5,991 |
| 3 | Бронза | 115 | 7,8 | 4,689 |
| 4 | 36НХТЮ | 130 | 6,9 | 4,148 |
| 5 | 35ХГСА | 210 | 4,271 | 2,568 |

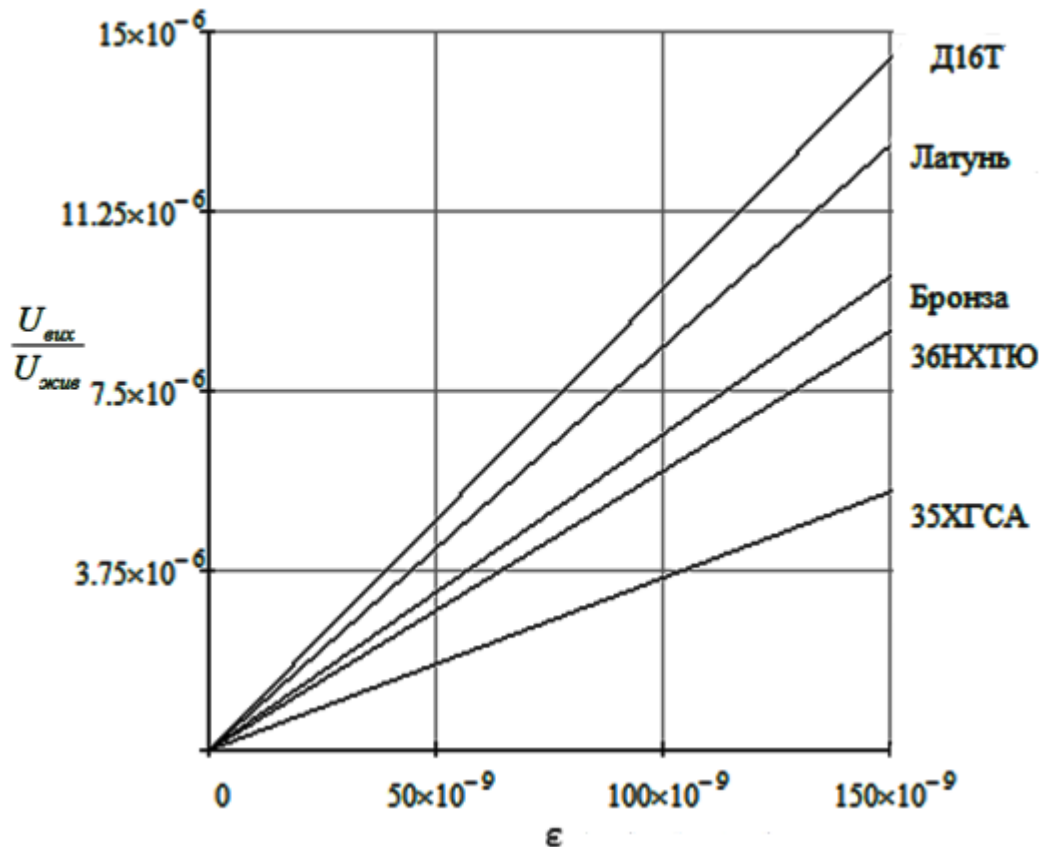


Рисунок 2.5 – Залежність вихідного сигналу від модуля Юнга

2.2.4 Амплітудо-частотна характеристика

Амплітудо-частотної характеристика – графік залежності відношення амплітуди вихідного сигналу системи до амплітуди вхідного гармонічного сигналу від частоти[13]. Амплітудо-частотної характеристика представлена на рис. 2.6.

Для отримання амплітудо-частотної характеристики визначимо рівняння динаміки, яке має такий вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = ES\varepsilon(t), \quad (2.27)$$

- де x – переміщення чутливого елемента;
 m – маса чутливого елемента;
 b – коефіцієнт демпфування коливань;
 c – жорсткість чутливого елемента;

ε – деформація;

$m\ddot{x}$ – сила інерції;

$b\dot{x}$ – сила демпфування;

cx – сила пружності.

Перепишемо рівняння в операторному вигляді:

$$mp^2 x(p) + bx(p) + cx(p) = \varepsilon(p) \quad (2.28)$$

Передаточна функція перетворювача буде дорівнювати:

$$W(p) = \frac{X(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{mp^2 + bp + c}; \quad (2.29)$$

$$W(j\omega) = \frac{1}{-m\omega + bj\omega + c}, \quad (2.30)$$

де ω – частота вимушених коливань.

Амплітудо-частотна характеристика визначається за формулою [14]:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 * T^2)^2 + 4(\xi\omega T)^2}}; \quad (2.31)$$

$$T = \frac{1}{\omega_0}(c), \quad (2.32)$$

де T – стала часу;

ξ – коефіцієнт демпфування;

ω_0 – частота коливань.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{E * F}{\ell_1 * (M + \frac{1}{3} * M_1)}}, \quad (2.33)$$

де F – площа демпфуючої ділянки;

ℓ_1 – довжина демпфуючої ділянки;

M – маса пружного елемента;

M_1 – маса деформуєчої ділянки.

Значення параметрів дорівнюють:

$$E = 210 * 10^9 \text{ (Па)}; \quad F = 8,7 * 10^{-5} \text{ (м}^2\text{)}; \quad \ell_1 = 8 * 10^{-3} \text{ (м)};$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 45 |

$$M=0,309(\text{кг});$$

$$M_I=0,093(\text{кг});$$

$$\xi = 0.15.$$

Підставивши значення параметрів у формулу (2.33) отримуємо:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 87 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-3} \cdot (309 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{3} \cdot 93 \cdot 10^{-3})}} = 8,196 \cdot 10^4 (\text{с}^{-1});$$

$$T=12,2 \cdot 10^{-6}(\text{с}).$$

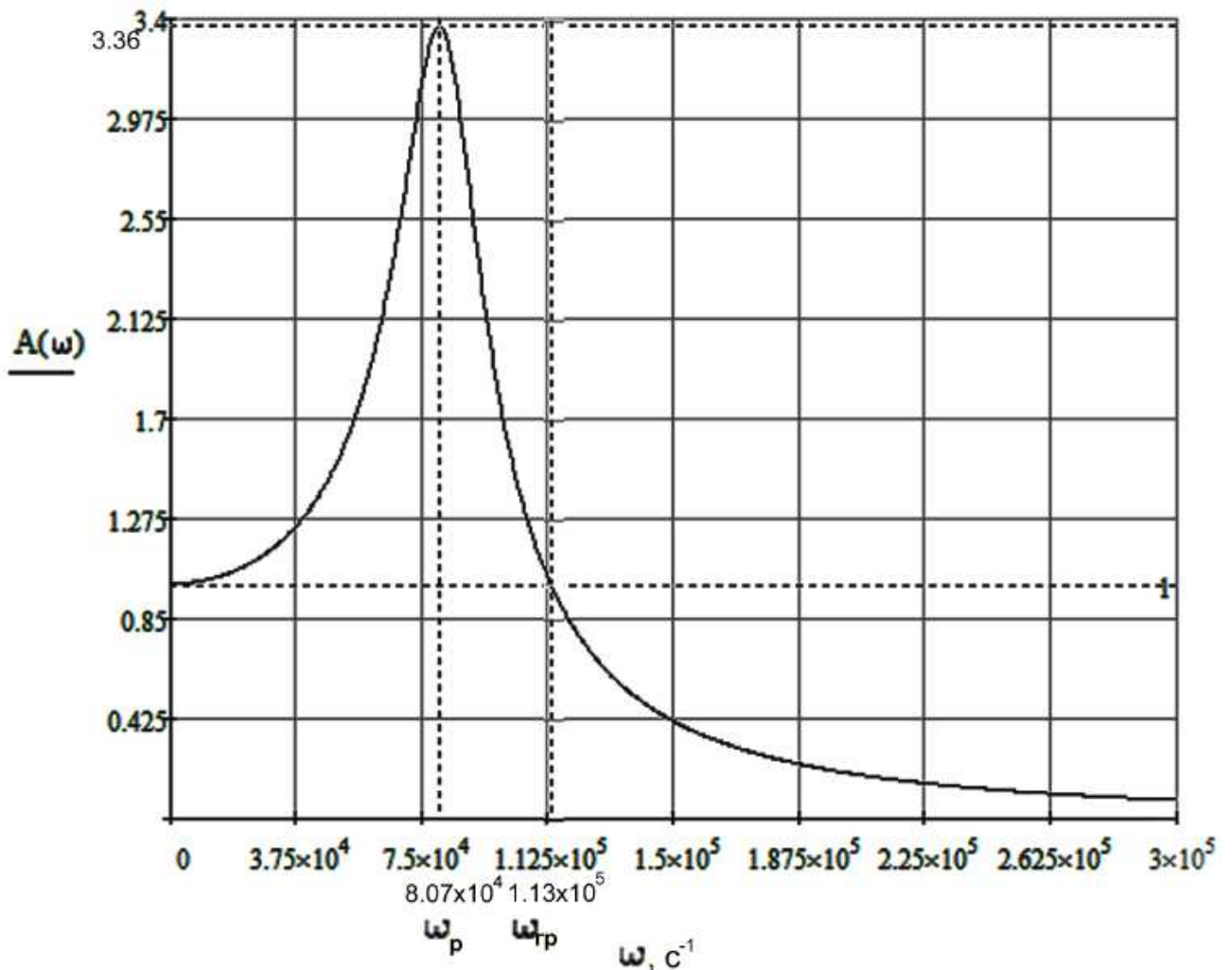


Рисунок 2.6 – Амплітудо-частотна характеристика

На амплітудо-частотній характеристиці можна виділити деякі характерні значення. При значенні частоти, яка дорівнює $8,07 \cdot 10^4 (\text{с}^{-1})$, виникає резонанс, тобто частота при якій амплітуда максимальна і дорівнює $3,36$. Також можна

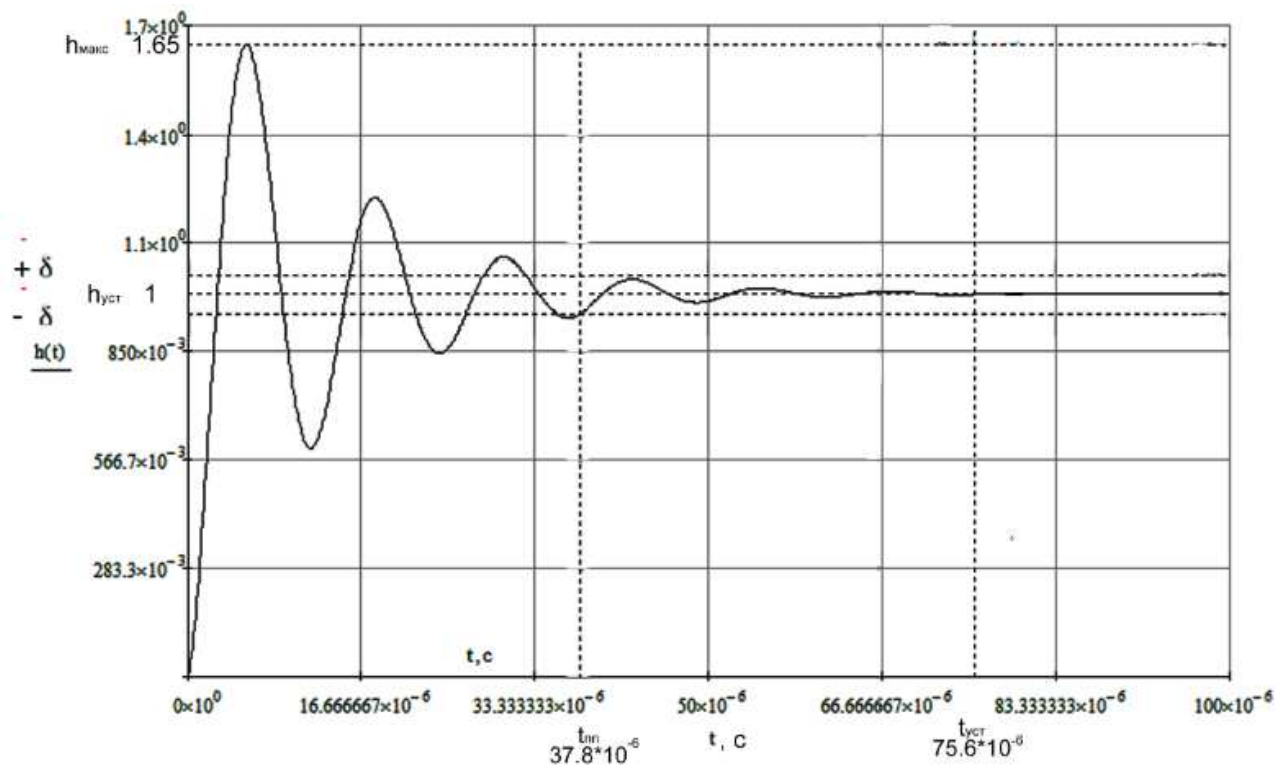


Рисунок 2.8 – Перехідна характеристика перетворювача

На перехідній характеристиці можна виділити деякі характерні значення:

- час встановлення сигналу, $t_{уст} = 75,6 * 10^{-6} (c)$;
- час перехідного процесу, $t_{ин} = 37,8 * 10^{-6} (c)$;
- перегулювання.

Перерегулювання визначається за формулою:

$$G = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{h_{\max}} * 100\% = 39\%$$

2.3 Розробка методики вимірювання деформації

Тензодатчики являються найбільш уразливими компонентами тензометричних систем. В процесі їх експлуатації на них діє агресивне середовище, ударне навантаження, механічні навантаження, електричне випромінювання, вібрація. Тому виникає необхідність діагностики

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 48 |

тензометричних датчиків під час проведення технічного обслуговування з періодичністю 12 місяців.

Для початку необхідно провести візуальний огляд стану датчика. А саме перевірити тензодатчик на:

- наявність шунта заземлення;
- стан різьбових з'єднань;
- відсутність корозії металів;
- відсутність механічних пошкоджень тензорезисторів та електронних компонентів;
- герметичність кабельних вводів та стан кабелю[15].

Після візуального огляду стану датчика необхідно провести ряд тестів: перевірка нульового балансу, перевірка опору ізоляції, перевірка цілісності тензометричного моста, перевірка під навантаженням.

2.3.1 Перевірка нульового балансу

Для повірки стану тензодатчика в ненавантаженому стані необхідно провести вимірювання нульового балансу. Для цього тензодатчик виключають зі складу системи та знімають все прикладене навантаження. Далі в ланцюг живлення необхідно підключити джерело живлення зі значенням напруги 12В(рис. 2.9). З ланцюга вихідної напруги знімають сигнал в мВ. Вимірний сигнал потрібно порівняти зі значенням в калібрувальному листі.

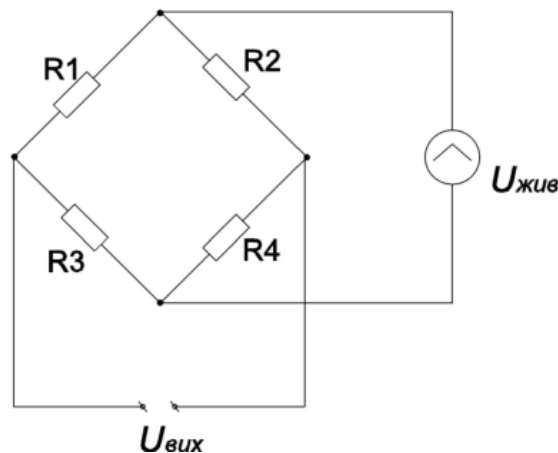


Рисунок 2.9 – Електрична схема перевірки балансу нуля

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 49 |

Тобто, при значенні робочого коефіцієнта перетворення тензодатчика, який рівний 2 мВ/В, та напрузі живлення 12 В отримаємо напругу нульового балансу, яка відповідає значенню 0,024В.

Якщо значення вихідного сигналу суттєво відрізняються від паспортних даних, то можна зробити висновок, що даний тензодатчик деформований та потребує калібрування, або заміни тензорезисторів чи датчика в цілому.

2.3.2 Перевірка опору ізоляції

Перевірка опору ізоляції проводиться за допомогою підключення мегомметра до кабелю тензодатчика та перевірки на наявність втрат струму між корпусом тензодатчика та струмопровідними частинами. Низьке значення опору ізоляції, яке менше за 1кОм сигналізує про коротке замикання. Нормальним значенням опору ізоляції вважається опір 5МОм. Коротке замикання може бути між корпусом тензодатчика та струмопровідними частинами, а також в кабелі. При короткому замиканні в кабелі та появі втрат струму, кабель необхідно замінити.

Потім необхідно перевірити опір контурів заземлення. Опір заземлення вимірюють мостом постійного струму між заземлюючим кільцем та кожною доступною до дотику металевою частиною датчика. Значення опору повинно бути не більше 0,3Ом.

2.3.3 Перевірка цілісності тензометричного моста

Цілісність моста Уінстона перевіряється шляхом зміни вхідного та вихідного пору, а також опору балансу моста. Вхідні та вихідні опори вимірюються омметром, який підключається до кожної пари вхідних та вихідних проводів тензодатчика. Потім порівнюються значення вхідного та вихідного опору зі значеннями, які наведені в калібрувальному сертифікаті або в технічній специфікації. Опір балансу моста вимірюється почерговим

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 50 |

підключенням омметра до кожної пари виводів кабеля. Значення опору між парами не повинно відрізнятися більше ніж на 1-2 Ом. Якщо різниця вхідного та вихідного пору тензодатчика суттєво відрізняється від паспортних даних, то можна зробити висновок про несправність тензометричного моста Уінстона. Поява розбалансу опору означає непрацездатність тензодатчика та необхідність його заміни.

Такі несправності з'являються внаслідок електричної дії (зварювання, статичне поле, електричний пробій), фізичного впливу (удари, прокручування, зміщення, бокове навантаження) та термічного впливу.

2.3.4 Перевірка під навантаженням

Для початку перевірки на навантаження тензодатчик підключають до пристрою зі стабільним джерелом струму, який має значення не менше за 10В. За допомогою мілівольтметра, підключеного на виході тензодатчика, навантажують тензодатчик та фіксують покази вихідного сигналу. При знятті навантаження покази вихідного сигналу повинні повернутися в початкове положення. В разі якщо покази будуть суттєво відрізнятися при постійно прикладеному навантаженні та не будуть повертатися в початкове положення, то можна зробити висновок, що є порушення контакту клеєвого шару між тензорезисторами та пружним елементом. Тоді тензодатчик потрібно замінити[16].

2.3.5 Градування тензометричного датчика деформацій

Градування тензодатчика дозволить встановити чутливість тензометричної системи до вимірювальної величини, перевірити роботу системи на всьому діапазоні зміни вхідної величини. Градування проходить наступним чином: на вхід тензометричної системи подають відомі значення

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 51 |

вимірювальної величини, наприклад відносної деформації, а на виході фіксують реакцію системи на цю дію (рис. 2.10).

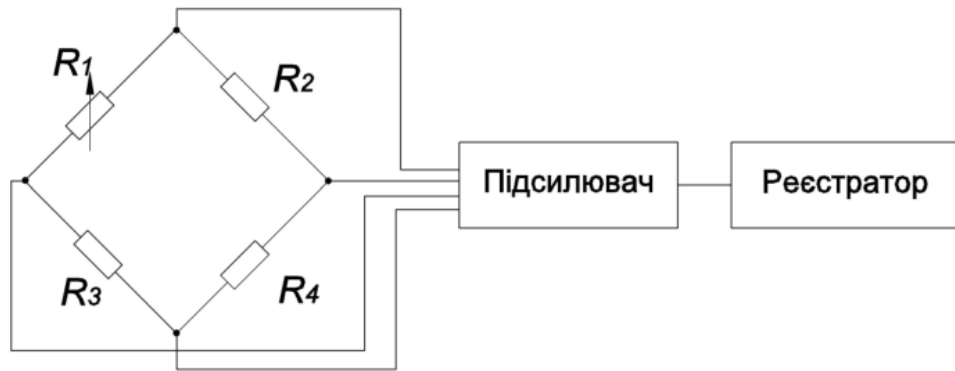


Рисунок 2.10 – Електрична схема реєстрації вихідного сигналу при градуюванні

Частіше всього, як джерело еталонної деформації, використовують градуювальні балки консольного типу (рис. 2.11). Їх виготовляють з високоміцних матеріалів з високими пружними властивостями та лінійними характеристиками не менше 0.3%.

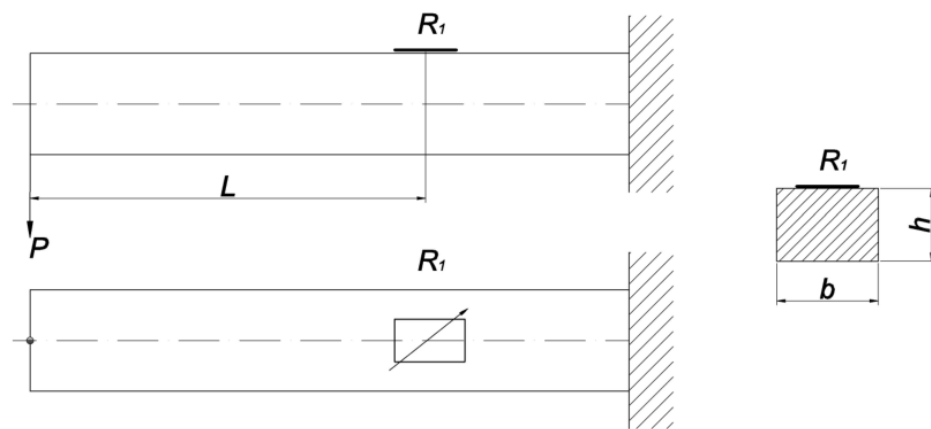


Рисунок 2.11 – Градуювальна консольна балка

При використанні балки з постійним поперечним перерізом досить легко розрахувати рівень деформації в точці розташування центру чутливості тензорезистора. Деформація консольної балки в місці закріплення тензорезистора визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{M}{W * E} = 6 * \frac{P * l}{b * h^2 * E}, \quad (2.36)$$

де M – момент, Н*м;
 W – момент опору, м³;
 E – модуль пружності, Па;
 P – прикладена сила, Н;
 b – ширина консольної балки, м;
 h – товщина консольної балки, м;
 l – відстань від точки прикладеної сили до центру чутливості тензорезистора, м.

Необхідно з достатньою точністю знати значення модуля пружності матеріалу балки. Тензорезистори, які приклеєні на консольній балці повинні бути з однієї партії з тензорезисторами, які використовуються на тензодатчику, що градується.

Варто зауважити, що вимірювальний міст (кількість включених активних датчиків, їх місце в вимірювальному мості), а також довжина з'єднувальних проводів та їх переріз при градуюванні повинні бути такими ж, як і на досліджуваному тензодатчику. Від величини опору з'єднувальних проводів залежить чутливість вимірювального моста до деформацій. Таке градуювання має назву механічного градуювання. Воно проводиться на початку експерименту та є достатньо трудомістким.

На додачу до механічного градуювання на практиці часто застосовують електроградування. При електроградуванні зміна відносного опору плеча вимірювального моста, яка викликана деформацією тензорезистора, замінюють шунтуванням тензодатчика високоомним еталонним резистором (рис. 2.12). Використовуючи різноманітні еталонні резистори є можливість імітувати стандартні деформації, які дорівнюють 100, 200, 500, 1000 та 2000 мкм/м.

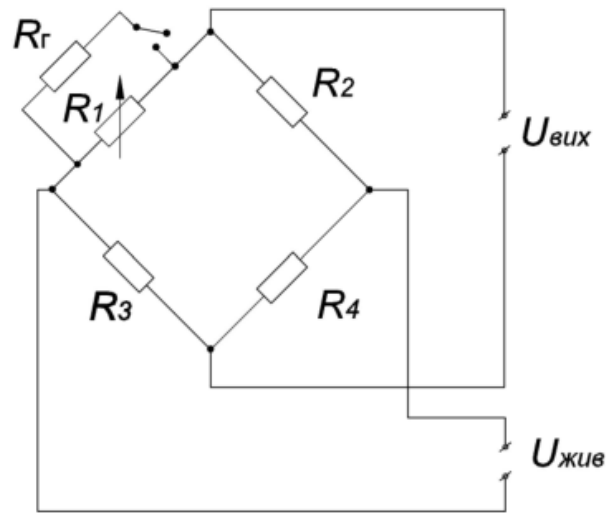


Рисунок 2.12 – Електроградування еталонним резистором

Апаратно більш зручно шунтувати не активний тензорезистор, а пасивний резистор, наприклад R_2 , але при цьому не буде враховуватись вплив опору з'єднувальних проводів (рис. 2.13). Після градуювання тензодатчика подальша щоденне градуювання може здійснюватись шляхом шунтування резистора R_2 , оскільки опір з'єднувальних проводів не змінюється.

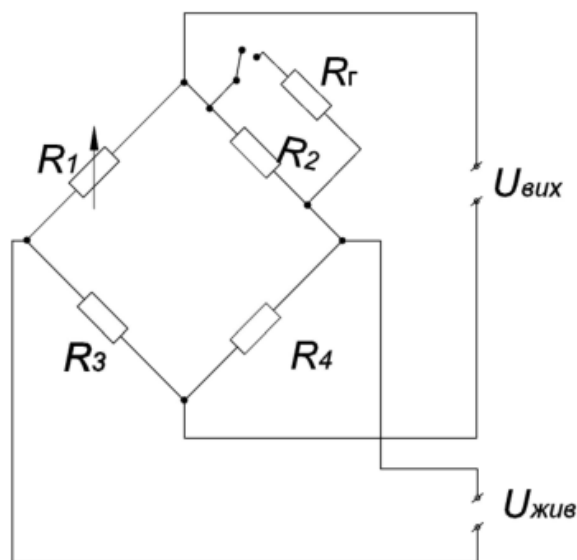


Рисунок 2.13 – Електроградування з використанням шунтування неактивного тензорезистора

На рис. 2.14 представлено вигляд структурної схеми тензодатчика з використанням градуювання.

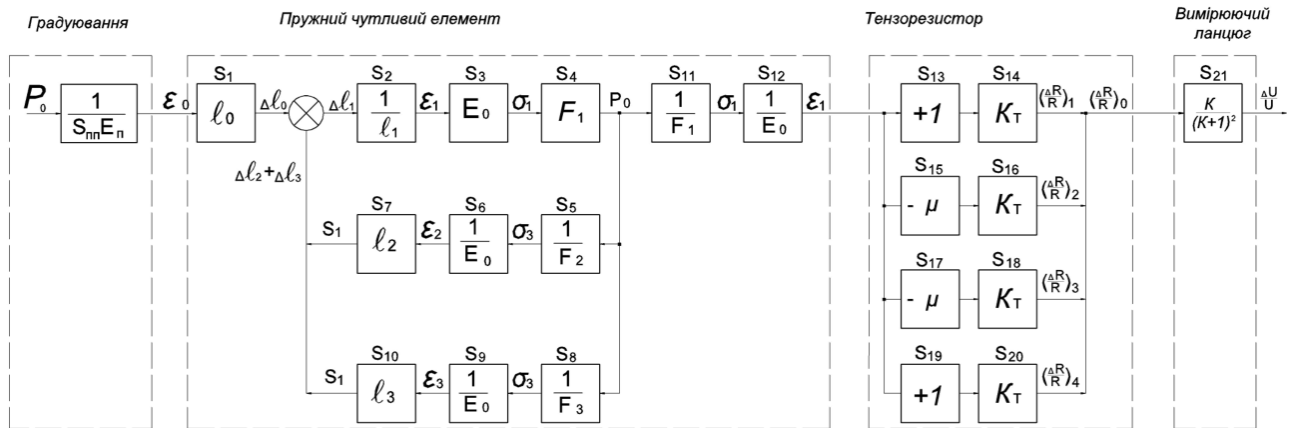


Рисунок 2.14 – Структурна схема градуювання тензометричного датчика

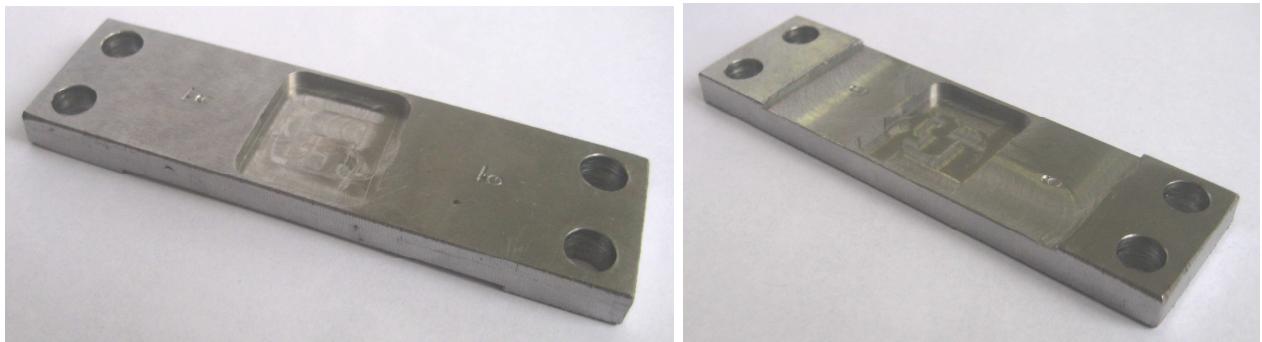
Для підтримки постійної чутливості тензометричної системи до вимірювальної величини проводять калібрування каналів. На відміну від електроградування, при калібрування після подачі еталонного сигналу на вхід вимірювального каналу встановлюють певний рівень вихідного сигналу, змінюючи коефіцієнт підсилення системи[11].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З МЕХАНІЧНИМ ПІДСИЛЮВАЧЕМ

В ході виконання магістерської дисертації було проведено експериментальне дослідження пружного елемента тензометричного датчика деформацій.

3.1 Підготовка експерименту

Для проведення експерименту необхідно підготувати пружний елемент, який зображено на рис.3.1.



а

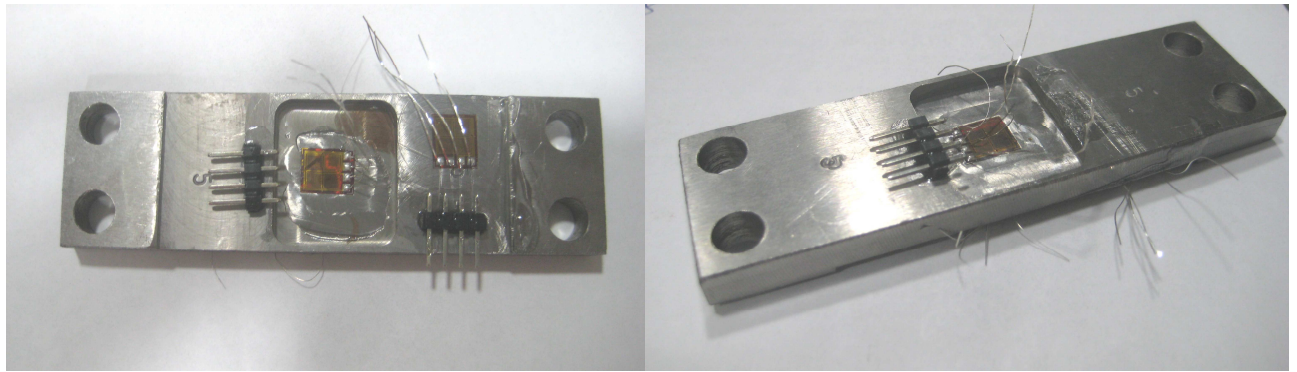
б

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд пружного елемента:

а – вид зверху; б – вид знизу.

Для цього на зачищену та знежирену поверхню пружного елемента необхідно наклеїти тензорезистори цакриновим клеєм. Тензорезистори являють собою повно мостову схему. Розташування тензорезисторів на пружному елементі наведено на рис. 3.2.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 56 |



а

б

Рисунок 3.2 – Пружний елемент з наклеєними тензорезисторами:

а – вид зверху; б – вид знизу

До кожного тензорезистора припаяно по шість проводів, оскільки використовується 6-ти проводів схема мосту Уінстона (див. рис. 2.1 с.30). На другому кінці проводів приєднано роз'єм DB9. На рис. 3.3 зображено готовий зразок тензометричного датчика деформації, який буде досліджено на розтяг.

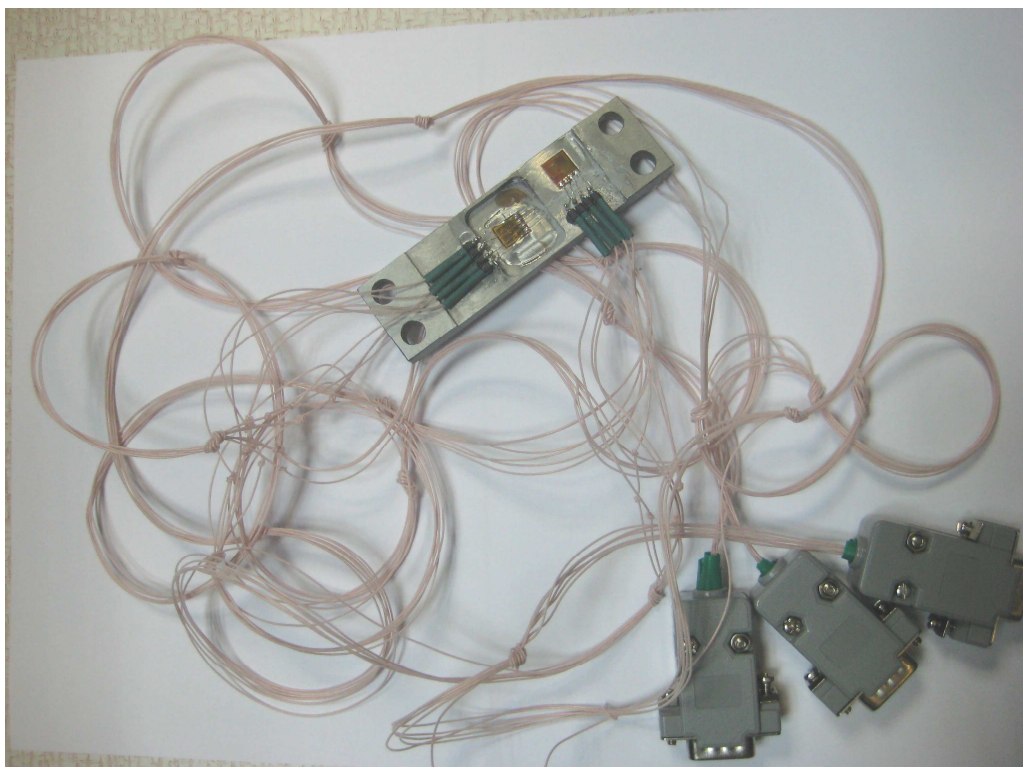


Рисунок 3.3 – Досліджуваний тензорезисторний датчик

3.2 Проведення експерименту

Об'єкт дослідження встановлюється в зажимні клєми розривної машини TIRA test 2300, як показано на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Встановлений тензометричний датчик

Роз'єми тензодатчика підключено в зчитувальні пристрої (рис. 3.5), з яких буде зчитуватись значення РКП кожного тензомоста.



Рисунок 3.5 – Підключення тензорезисторного датчика

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 58 |

Самі зчитувальні пристрої підключені через шину даних до комп'ютера(рис. 3.6).

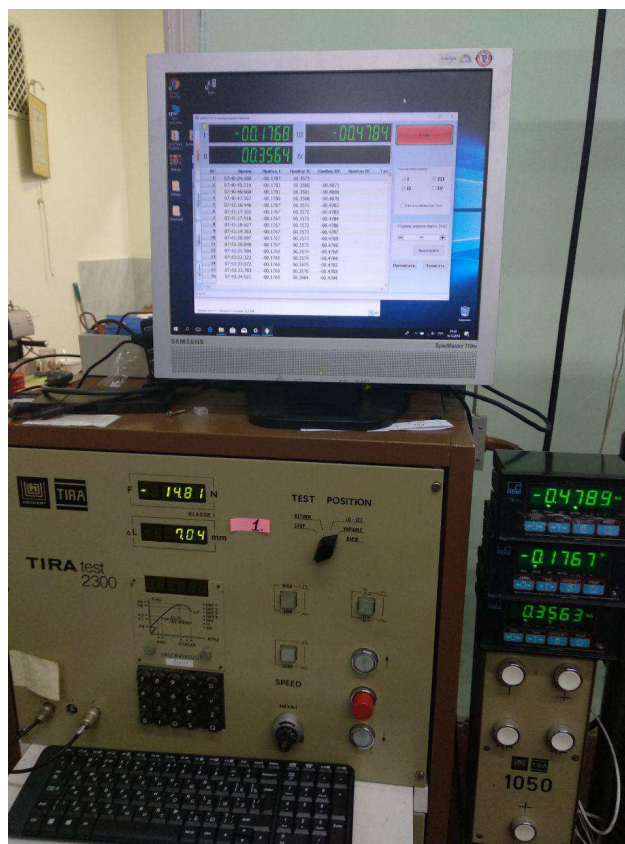


Рисунок 3.6 – Апаратна частина випробувального комплексу

Далі до датчика прикладається механічне навантаження, яке розтягує тензOMETричний датчик деформації. Максимально допустиме навантаження на даній розривній машині рівне 100 кг. За допомогою програмного забезпечення знімаються значення зміщення величини довжини активної частини тензодатчика та відповідній їй прикладеної сили. Також отримано значення РКП з трьох тензорезисторів, які знімаються через певний проміжок часу.

Тензорезисторний датчик деформації пройшов три цикли розтягу. Далі було проведено обробку отриманих даних.

3.3 Обробка результатів вимірювання

Таблиці отриманих результатів експерименту наведені в додатку А. Відповідність найменуванню РКП в табл. А1 до розташування тензорезисторів на зразку та габаритні розміри зразка зображено на рис. 3.7.

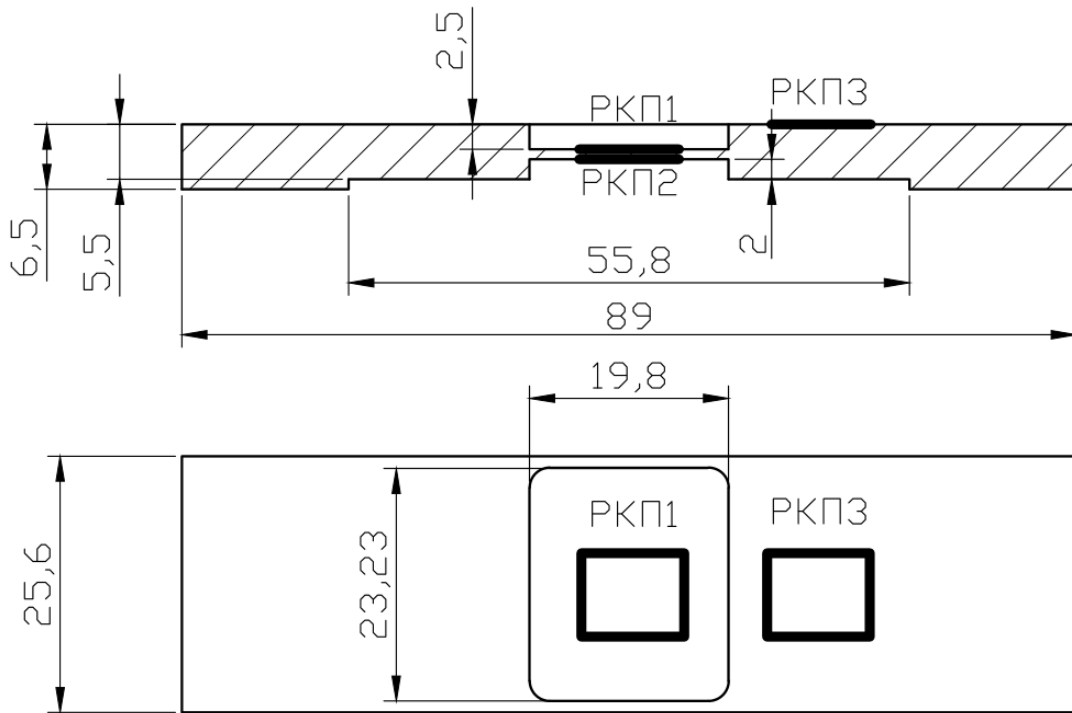


Рисунок 3.7 – Схема розташування тензорезисторів

Тобто площа поперечного перерізу ділянки, де наклеєні тензорезистори 1 та 2 дорівнює $35,95(\text{мм}^2)$. Площа поперечного перерізу ділянки, де наклеєний тензорезистор 3 дорівнює $140,8(\text{мм}^2)$.

На рис. 4.8 наведено графік залежності РКП1, РКП2 та РКП3 від значення прикладеної сили.

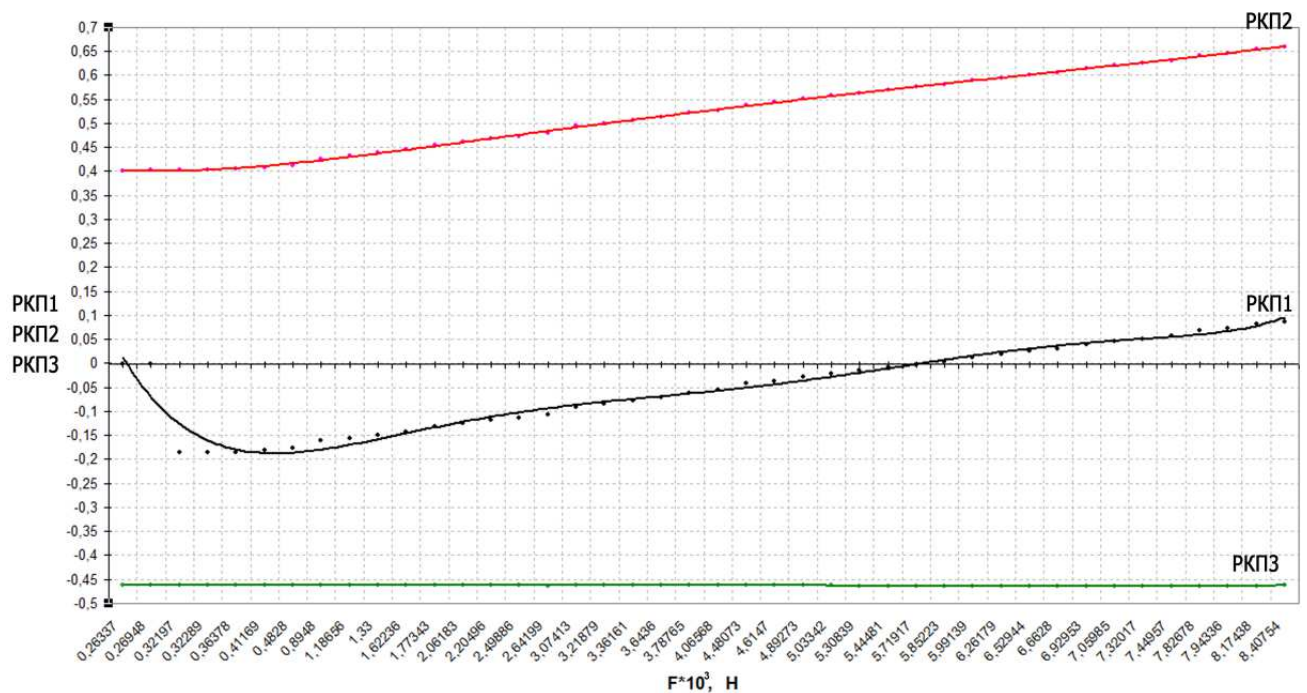


Рисунок 3.8 – Графік залежності РКП1, РКП2 та РКП3 від значення прикладеної сили

Апроксимація даних виконувалась за поліномом 6-го порядку. Нижче наведено рівняння апроксимації даних, отримані в програмному середовищі MS Excel:

– РКП1: $y = 6E-09x^6 - 9E-07x^5 + 5E-05x^4 - 0,0014x^3 + 0,0205x^2 - 0,1344x + 0,1272$;

– РКП2: $y = 2E-10x^6 - 3E-08x^5 + 2E-06x^4 - 8E-05x^3 + 0,0015x^2 - 0,0058x + 0,4071$;

– РКП3: $y = -1E-10x^6 + 2E-08x^5 - 8E-07x^4 + 2E-05x^3 - 0,0002x^2 + 0,0008x - 0,4626$.

З графіку видно, що значення РКП3 майже не змінюється. Це відбувається тому, що місце де розташований тензорезистор має більшу площу поперечного перерізу, тому чутливість приладу на даній ділянці невелика. Отже можна зробити висновок, що наклеювати тензорезистори на цій ділянці недоцільно.

Тензомости, які відповідають значенням РКП1 та РКП2, розташовані на ділянці з меншою площею поперечного перерізу, тому вихідний сигнал цих тензорезисторів змінюється з навантаженням. Товщина даної ділянки значно

менша, за довжину активної ділянки тензодатчика, тому можна вважати, що ця ділянка є концентратором навантажень.

Графік залежності РКП1 від прикладеної сили та зміщення при трьох послідовно проведених циклів навантаження наведено на рис. 3.9 та рис. 3.10 відповідно.

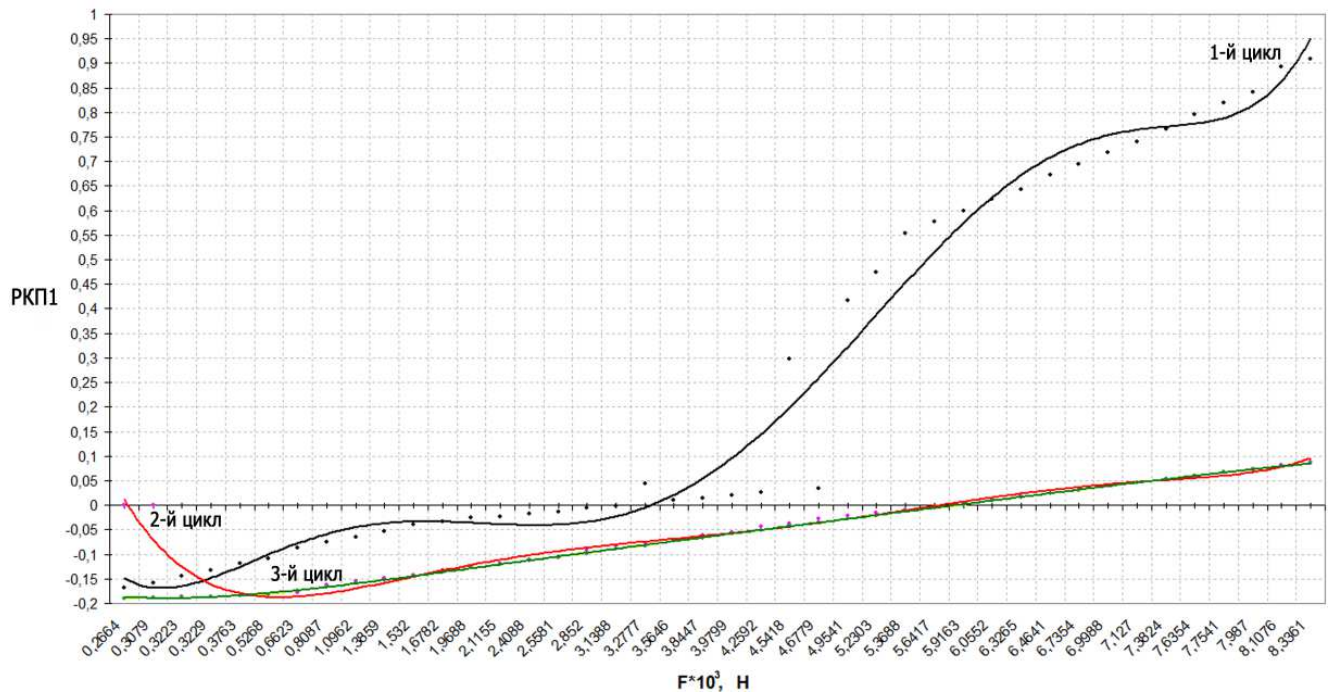


Рисунок 3.9 – Графік залежності РКП1 від прикладеної сили

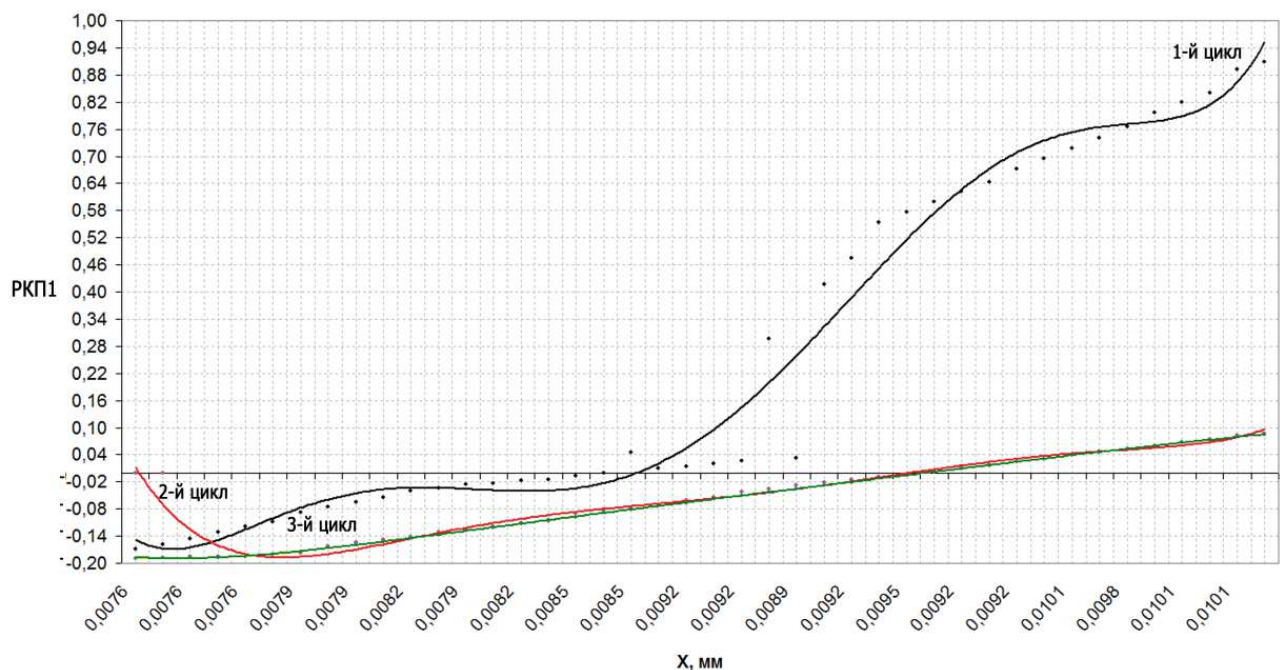


Рисунок 3.10 – Графік залежності РКП1 від зміщення

З графіків видно, що при першому циклі розтягу датчика, значення некоректні, оскільки пружний елемент до цього не розтягувався. Для отримання коректних даних необхідно було «розігнати» матеріал, тобто навантажити та розвантажити. Отже будемо вважати перший цикл «розгоном» матеріалу.

Графік залежності РКП2 від прикладеної сили та зміщення при трьох послідовно проведених циклів навантаження наведено на рис. 3.11 та рис. 3.12 відповідно.

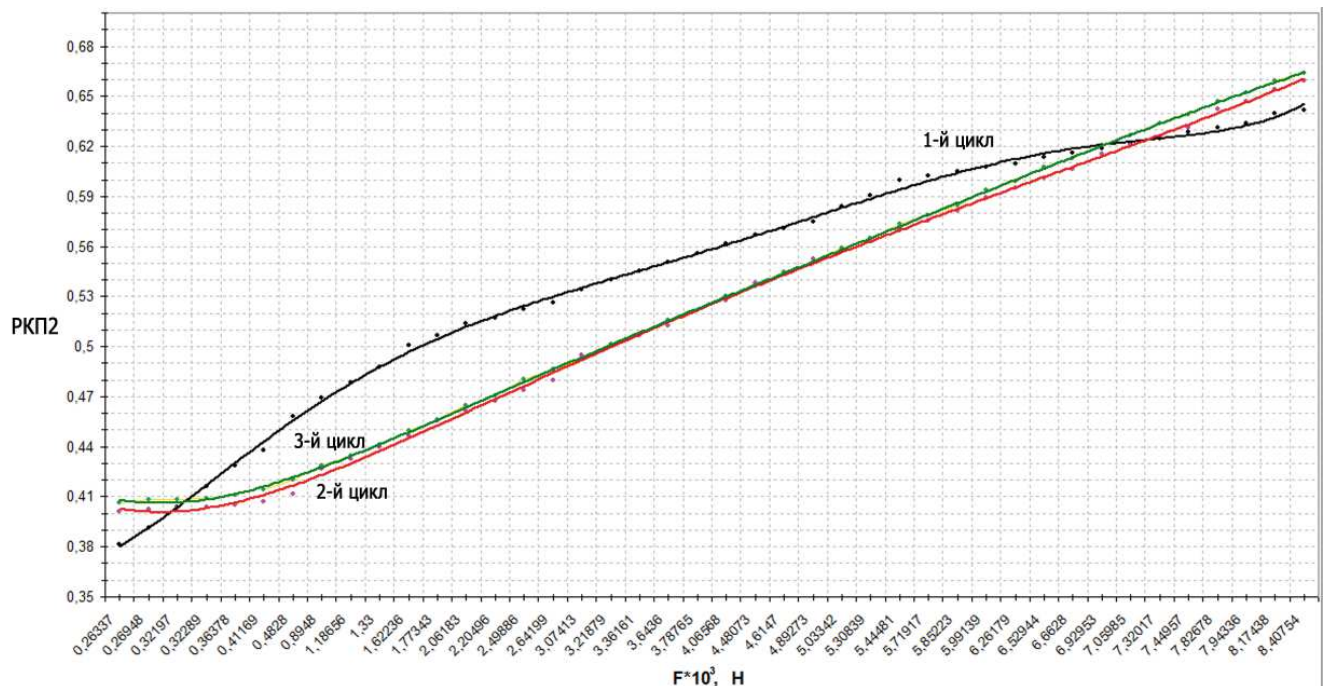


Рисунок 3.11 – Графік залежності РКП2 від прикладеної сили

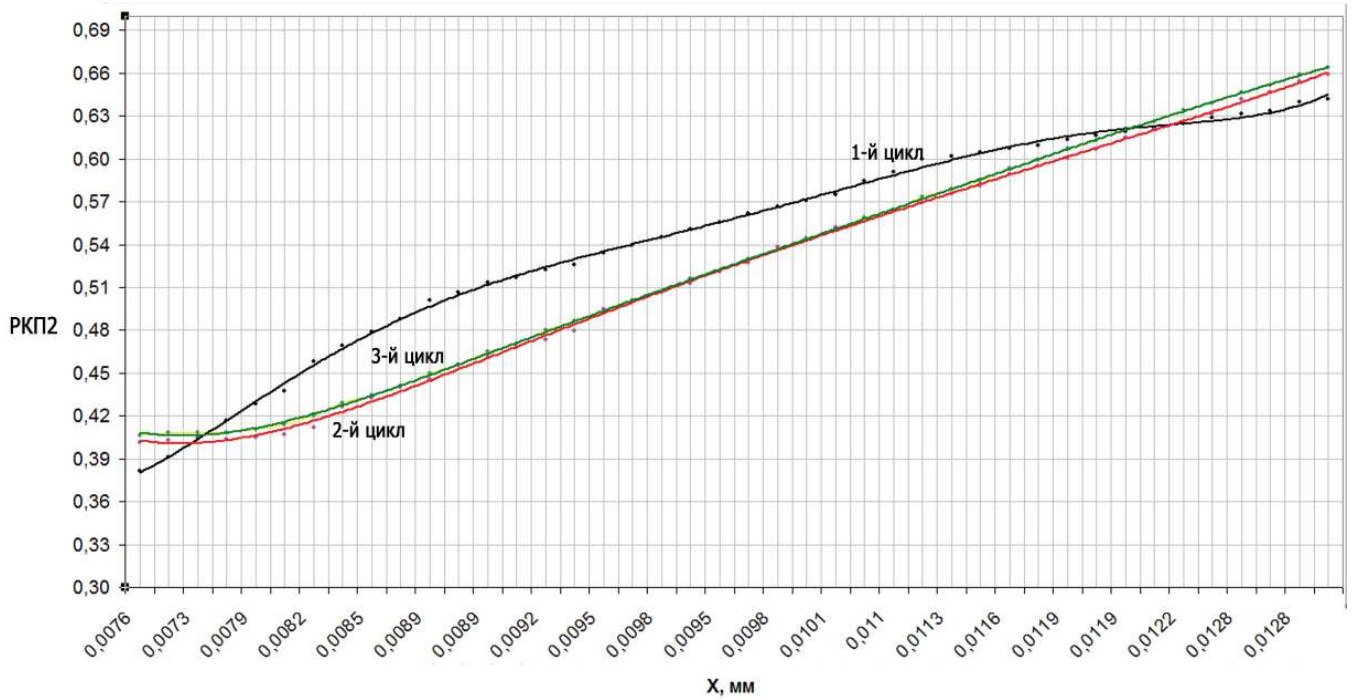


Рисунок 3.12 – Графік залежності РКП2 від зміщення

З графіків видно, що при другому та третьому циклах навантаження значення РКП1 та РКП2 майже рівні, а їх відмінність обумовлюється похибками вимірювання та властивостями матеріалу витримувати навантаження.

Графік залежності РКП3 від прикладеної сили та зміщення при трьох послідовно проведених циклів навантаження наведено на рис. 3.13 та рис. 3.14 відповідно.

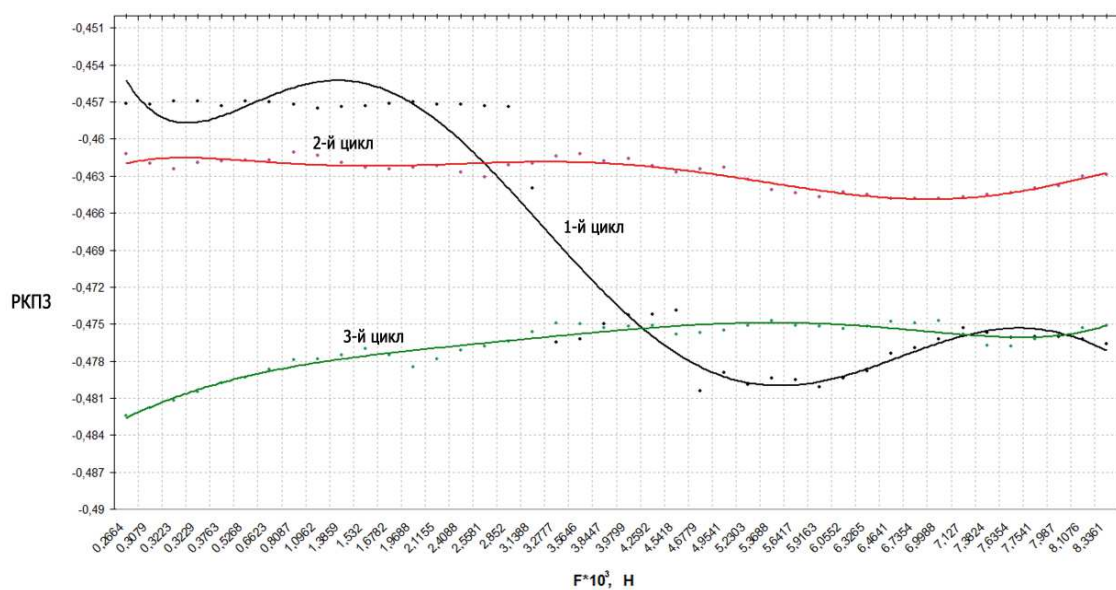


Рисунок 3.13 – Графік залежності РКП3 від прикладеної сили

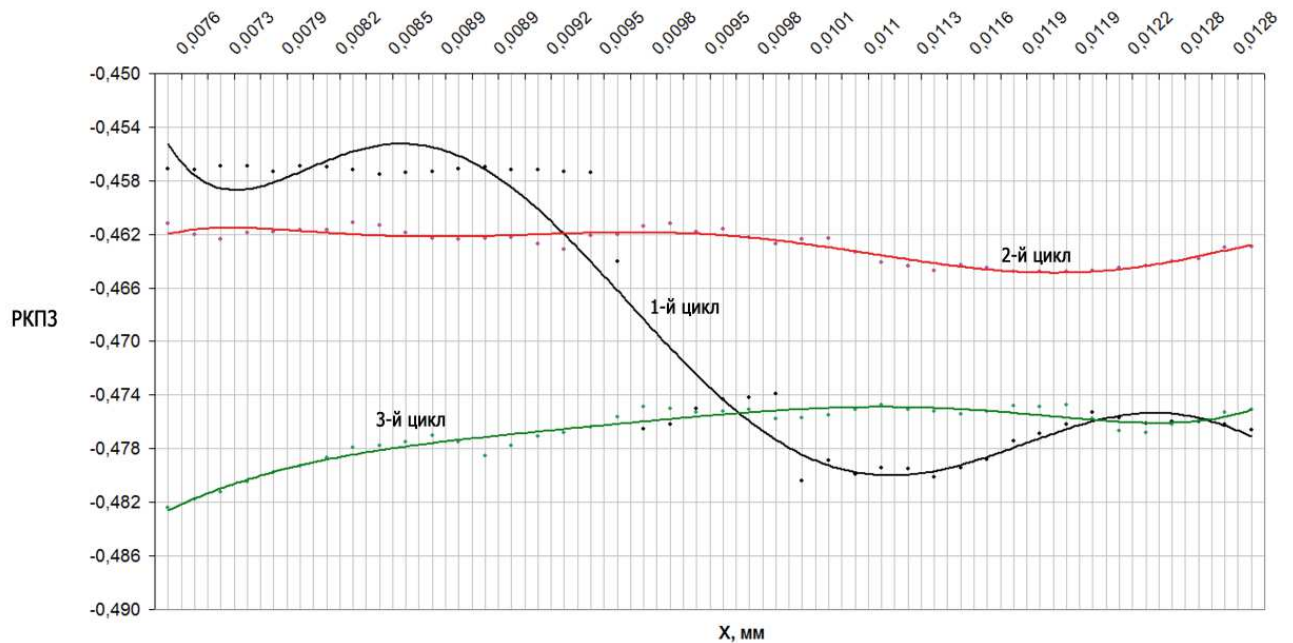


Рисунок 3.14 – Графік залежності РКПІ від зміщення

З графіків видно, що значення РКПІ при другому та третьому циклах майже не змінюються. Це відбувається через те, що площа поперечного перерізу ділянки вимірювання достатньо велика.

3.4 Висновок

В результаті проведеного експерименту визначено, що найтонша ділянка на пружному елементі тензодатчика є концентратором деформацій. Тому саме на цю ділянку необхідно наклеювати тензорезистори. Ділянка з більшою площею поперечного перерізу майже не чутлива до деформацій.

Визначено, що при проведенні експерименту необхідно спочатку навантажити та розвантажити об'єкт дослідження. Це дозволить отримати більш достовірні результати.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ: ТЕНЗОМЕТРИЧНА СИСТЕМА З МЕХАНІЧНИМИ ПІДСИЛЮВАЧАМИ

Стартап в Україні є відносно новим явищем і використовується як спільна назва нового проекту. Стартапом вважається відносно молода компанія, яка має інноваційну бізнес ідею, проте не має необхідних ресурсів для її реалізації. Тому кожен автор стартап-проекту має на меті просунути свою ідею та знайти власну команду для реалізації задуми, а також знайти джерела фінансування.

В рамках роботи над магістерською дисертацією поставлено задачу виконання першого етапу розробки стартап-проекту – маркетингового аналізу.

4.1 Опис ідеї проекту

Ідеєю стартап-проекту є описана в попередніх розділах магістерської дисертації, а саме «Тензорезисторна система з механічними підсилювачами деформацій». На даному етапі необхідно визначити зміст ідеї, напрямки застосування, вигоди які може отримати користувач товару (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап проекту

| Зміст ідеї проекту | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|---|--------------------------------------|---|
| Тензорезисторна система з механічними підсилювачами | Будівництво | користувач, ще на стадії виробництва контролює відповідність будівельних конструкцій технічним умовам |
| | Лабораторні дослідження | можливість проводити лабораторні дослідження будь-якого дослідного зразка |
| | Контроль та діагностика стану споруд | можливість запобігти руйнуванню конструкції споруд внаслідок отриманих деформацій |

Отже, ідеєю стартап-проекту є виконання такої тензорезисторної системи з механічними підсилювачами, яка буде використовуватись

споживачами в сфері лабораторних досліджень, будівництва та контролю стану вже існуючих об'єктів для запобігання руйнуванню несучих конструкцій споруд, тим самим скоротивши витрати на ремонт.

Головними конкурентами в даній області є іноземні компанії такі як НВМ(Німеччина), Keli (Китай) та Gefran (Італія), які займаються виготовленням датчиків сили та деформації, а також електронних компонентів та зчитуючі пристроїв до цих датчиків.

Тому далі проводимо аналіз техніко-економічних переваг ідеї, порівняно з пропозиціями вище перелічених конкурентів. В табл. 4.2 проводиться порівняльний аналіз показників мого проекту та визначаються його слабкі, нейтральні та сильні сторони.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

| № | Техніко економічні характеристики | Потенційні товари або концепції конкурентів | | | | слабка сторона | нейтральна сторона | сильна сторона |
|---|--|---|------------|------------|------------|----------------|--------------------|----------------|
| | | мій проект | НВМ | Keli | Gefran | | | |
| 1 | Економічність (ціна) | низька | висока | низька | середня | | | X |
| 2 | Естетичні (габарити) | малі | малі | малі | малі | | X | |
| 3 | Екологічні (наявність шкідливих домішок) | не містить | не містить | не містить | не містить | | X | |
| 4 | Технічні (вихідний сигнал) | цифровий | аналоговий | аналоговий | аналоговий | | | X |
| 5 | Безпечність | безпечний | безпечний | безпечний | безпечний | | X | |

На основі даного аналізу було визначено, що даний проект не уступає пропозиціям своїх головних конкурентів, а також має ряд переваг. Порівняно з товарами конкурентів мій продукт має нижчу ціну за тією ж якістю, що робить продукт доступнішим ширшому сегменту споживачів. Даний продукт має

цифровий вихідний сигнал, що дозволяє знімати показання датчика без використання додаткових цифрових перетворювачів, які можуть внести додаткові похибки. Тому такий пристрій є більш точним в порівнянні з пристроєм з аналоговим виходом. За наявністю шкідливих домішок та безпечністю використання мій продукт не уступає товарам перелічених конкурентів.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

На цьому етапі необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна здійснити реалізацію стартапу. Аналіз проводиться за допомогою визначення технології здійсненності ідеї проекту (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

| № | Ідея проекту | Технологія реалізації | Наявність технології | Доступність технології |
|--|--|---|----------------------|------------------------|
| 1 | Приварювальний поверхневий датчик деформації | Вимірювання відбувається за допомогою волоконно-оптичних датчиків | + | - |
| 2 | П'єзоелектричний датчик деформації | Вимірювання відбувається за рахунок виникнення різниці потенціалів на п'єзоелементі при деформації | + | - |
| 3 | Тензорезисторний датчик деформації | Вимірювання відбуваються за допомогою використання тензорезисторів, опір яких змінюється при появі деформації | + | + |
| Обрана технологія реалізації проекту: Тензорезисторний датчик деформації | | | | |

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що є можливість реалізації проекту. Проте для цього необхідне фінансування, якого немає на даному етапі. Визначено, що доцільно обрати технологію реалізації проекту, яка описана як «Тензорезисторний датчик деформації». Дана технологія є доцільною, оскільки всі компоненти, які необхідно закупити чи

виготовити, доступні та коштують значно менше. Також сама технологія вимірювання дозволяє отримувати більш точний результат.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для планування напрямків розвитку проекту необхідно провести попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № | Показники стану ринку | Характеристика |
|---|---|---|
| 1 | Кількість головних гравців, од | 5 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн./ум.од. | 9000 |
| 3 | Динаміка ринку (якісна оцінка) | зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу | велика конкуренція на міжнародному ринку, необхідність великого стартового капіталу |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | відсутні |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі, % | 36 |

Визначено, що динаміка ринку зростає та середня норма рентабельності в галузі перевищує банківський відсоток на вкладення, тому перепон для вкладення в даний проект немає. Невелика кількість головних гравців є важливим фактором конкурентоспроможності на ринку. Враховуючи, що таких конкурентів не більше п'яти і всі вони знаходяться за кордоном, то можна зробити висновок, що в нашій країні конкуренція незначна. Проте для виходу на міжнародний ринок конкуренція є значною перепорою для входу на ринок. Тому за попереднім оцінюванням проект є привабливим для входження у ринок.

Далі визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано приблизний список вимог до товару (табл. 4.5).

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 69 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|---|---|---|--|
| Вимірювання деформацій напруженого стану конструкцій споруд | - Будівельні компанії; - науково дослідні інститути; - власники великомасштабних об'єктів | - Будівельні компанії використовують такий прилад для контролю виконання технічних умов забудови; - НДІ використовують датчик для дослідження об'єктів вимірювання; - використання приладу для моніторингу стану опорних споруд в об'єктах, введених в експлуатацію | - точність вимірювання; - простота використання; - універсальність |

Отже цільовою аудиторією для придбання товару будуть будівельні компанії, науково-дослідні інститути та власники великомасштабних об'єктів. Саме в цих споживачів може виникнути потреба в використанні даного продукту, оскільки у всіх вище перелічених структурах є необхідність контролю та діагностики стану конструкцій для своєчасного виявлення пошкоджень та їх усунення. Незалежно від об'єкту, на якому буде використовуватись даний продукт, користувач отримає необхідну точність. Також є можливість переналаштування приладу на вимірювання сили чи ваги, що робить його більш універсальним.

Надалі необхідно провести аналіз ринкового середовища, а саме визначити фактори загроз (табл. 4.6) та фактори можливостей (табл. 4.7).

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

| № | Фактор | Зміст загрози | Можлива реакція компанії |
|---|-------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Конкурентоспроможність | Існують закордонні фірми-виробники, які вже закріпилися на ринку | Закріплення на вітчизняному ринку за рахунок меншої ціни |
| 2 | Невелика кількість споживачів | Специфіка товару не дозволяє охопити багато сегментів ринку | Уніфікація приладу |
| 3 | Зміна рівня цін | Нестабільність курсу валют | Збільшення ціни та впровадження бонусної системи |

Продовження таблиці 4.6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----------------------------------|--|--|
| 4 | Відсутність стартового капіталу | Деталі та компоненти приладу необхідно закупати одразу тому для розробки та виготовлення товару необхідний значний стартовий капітал | Пошук інвесторів чи купівля в кредит |
| 5 | Нестабільна політична обстановка | Через нестабільну політичну обстановку є загроза закриття каналу постачання необхідних компонентів з закордону | Пошук вітчизняних аналогів, виготовлення власних компонентів |

З таблиці видно, що для просування мого проекту на ринок є ряд перешкод. Через наявність закордонних фірм конкурентів складно закріпитись на міжнародному ринку, тому спочатку необхідно закріпитись на лідируючих позиціях на внутрішньому ринку. Оскільки даний товар не є товаром масового вжитку, тому необхідно зробити його більш універсальним, щоб розширити сегмент споживачів всередині галузі. Оскільки закупівельна вартість компонентів буде зростати із ростом курсу валют, то і вартість приладу також буде підвищуватись. Для цього необхідно провести заходи, які дозволять зберегти клієнтів незважаючи на зростання ціни. Це може бути надання послуг з сервісного обслуговування та консультування, впровадження бонусної системи для постійних клієнтів. Через нестабільну ситуацію в середині країни виникає проблема закупівлі компонентів закордоном, тому необхідно провести пошук та закупівлю вітчизняних аналогів компонентів. Проте можна втратити точність та надійність роботи приладу.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

| № | Фактор | Зміст можливості | Можлива реакція компанії |
|---|---------------------------|-------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Технологічне забезпечення | Налагоджене виробництво | Виготовляються деталі нескладної конфігурації на сучасному обладнанні |

Продовження таблиці 4.7

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----------------------|--|---|
| 2 | Сервісна підтримка | Високий рівень інформаційних технологій та кваліфікованих робітників | Сервісне обслуговування клієнтів дистанційно через мережу Інтернет і/або на місці |
| 3 | Економічний | Підтримка державного виробника | Просування товару для застосування його у сфері держзамовлень |
| 4 | Новизна | Виникнення нових технологій | Безперервний моніторинг ринку та потреб споживачів |
| 5 | Робота за різних умов | Можливість роботи приладу як в приміщенні, так і ззовні | Проектування та конструювання приладу з урахуванням цих факторів |

Незважаючи на можливі загрози входження товару у ринок, існує перелік факторів можливостей, які забезпечують можливість впровадження продукту. За рахунок налагодженого виробництва є можливість виконання продукту за короткий термін, а отже споживач швидко отримає свій прилад. Служба сервісного обслуговування дозволить підтримувати контакт зі споживачами та зберігати їх за собою. За рахунок того, що є можливість отримати підтримку від держави, оскільки даний продукт можна використовувати в сфері містобудування та охорони державних пам'яток, собівартість товару може зменшитись. Значною перевагою є те, що такий прилад може працювати в різних кліматичних умовах та за різних умовах експлуатації. Він має добрі характеристики гігроскопічності, ударостійкості.

Проведемо аналіз пропозиції, де визначаються загальні риси конкуренції. В табл. 4.8 представлений ступеневий аналіз конкуренції на ринку, в якому визначено особливості конкурентного середовища та їх вплив на діяльність підприємства.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| № | Особливості конкурентного середовища | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства |
|---|---|--|---|
| 1 | Тип конкуренції: монополістична | - різноманітність послуг; - нецінові чинники: обслуговування, власний сайт, реклама, можливість оплати частинами, тощо; - легкий вхід та вихід фірми на ринок. | Виробляти уніфіковані прилади; Проводити якісне обслуговування та забезпечення клієнтів. |
| 2 | Рівень конкурентної боротьби: глобальний | Такий прилад є необхідним в будь-якій розвиненій країні світу, а особливо в мегаполісах | Виконання умов виробництва за міжнародними сертифікатами; проведення реклами на міжнародному рівні |
| 3 | За галузевою ознакою: галузева | Даний прилад застосовується лише в галузі вимірювальної техніки | Необхідно досягти оптимального співвідношення ціна/якість |
| 4 | Конкуренція за видами товарів: товарно-видова | Конкуренція між товарами одного виду, а саме датчиками деформації | Підвищення точності вимірювального приладу та зниження ціни |
| 5 | За характером конкурентних переваг: нецінова | Захоплення ринку за рахунок випуску нових товарів, відмінних від товарів конкурентів в даній галузі | Вдосконалення якості продукції, технології виробництва, умов продажу |
| 6 | За інтенсивністю: марочна | Роль торгівельної марки важлива, йде боротьба за бренд | Створення торгівельної марки та проведення рекламної політики |

Під час проведення ступеневого аналізу конкуренції на ринку визначили, що маємо монополістичну конкуренцію, оскільки ціна може зростати без втрачання торгових угод, проте таке зростання ціни може призвести до збитків, оскільки товар мало диференційований. Глобальний рівень конкурентної боротьби обумовлюється тим, що необхідність використання даного приладу є в будь-якому мегаполісі, особливо зараз, коли збільшується кількість хмарочосів. Оскільки переважає товарно-видова конкуренція, тобто конкуренція між датчиками вимірювання деформації, то необхідно підвищувати точність та якість приладу, не знижуючи ціни для закріплення на ринку в галузі вимірювальної техніки. Необхідне впровадження

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 73 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | | | | |

власної торгової марки для закріплення позицій на внутрішньому ринку і для подальшого виходу на міжнародний ринок.

Після аналізу конкуренції проведено більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за М. Портером (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти | Постачальники | Клієнти | Товари-замінники |
|------------------|---|--|---|---|---|
| Складові аналізу | HBM, Gefran, Keli | Наявність конкурентів, які давно вже на ринку | Вихід на міжнародний ринок та співпраця з країнами-лідерами | Пошук споживачем якісної продукції; пошук за доступним рівнем цін порівняно з власними прибутками | Відомі закордонні фірми та перевірений товар |
| Висновки | середня інтенсивність конкурентної боротьби | - є можливість виходу на ринок - є потенційні конкуренти - строки виходу їх на ринок 1 рік | Постачальники диктують умови роботи на ринку. | Клієнти диктують умови на ринку. Необхідність оптимального співвідношення ціна/якість | Необхідність створення та використання нових технологій, порівняно з конкурентами |

За аналізом конкуренції в галузі можна зробити висновок, що головними силами впливу є постачальники та споживачі. Від постачальників залежить ціна на компоненти товарів, швидкість постачання в країну призначення та розмір поставок. Від споживачів залежить ціна на товар, оскільки споживач буде порівнювати її не тільки з ціною на товари-аналоги, а й з власним прибутком. Також споживачі вимагають оптимального співвідношення ціна/якість. Також важливу роль грає конкуренція між прямими конкурентами, тому що мій проект спирається на вже встановлений провідними фірмами-конкурентами рівень ціни, якості та точності. Тому для досягнення конкурентоспроможності необхідно весь час оновлювати продукцію, використовувати нові технології. Згідно проведеного аналізу проект має сильні сторони, такі як низька ціна з якістю, яка не поступається товарам конкурентів, використання вітчизняного

обладнання, переваги за рахунок наявності цифрового виходу та можливості використання в різних умовах середовища. Отже з огляду на конкурентну ситуацію можна зробити висновок про те, що є можливість конкурувати на ринку.

В табл. 4.10 визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності, сформований на результатах попередніх аналізів.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим) |
|---|-------------------------------|--|
| 1 | Конкурентність | Відсутність конкурентів на вітчизняному ринку |
| 2 | Економічний | Низька ціна приладу за необхідної якості |
| 3 | Технічний | Наявність цифрового вихідного сигналу |
| 4 | Технологічний | Можливість виготовлення механічної частини приладу на місцевому виробництві |
| 5 | Сервісне забезпечення | Своєчасне надання послуг сервісного обслуговування та підтримки на території України |
| 6 | Умови роботи | Можливість роботи приладу в різних кліматичних умовах |
| 7 | Універсальність | Можливість пристосувати прилад для вимірювання не тільки деформації, а й для вимірювання сили та ваги. |

В табл. 4.11 представлено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту на основі даних, представлених в табл. 4.10.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з моїм проектом | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----------|--|----|----|---|----|----|----|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1 | Конкурентність | 17 | X | | | | | | |
| 2 | Економічний | 16 | | | X | | | | |
| 3 | Технічний | 10 | | | X | | | | |
| 4 | Технологічний | 10 | | | | X | | | |
| 5 | Сервісне забезпечення | 10 | | X | | | | | |
| 6 | Умови роботи | 10 | | | X | | | | |
| 7 | Універсальність | 8 | | | | X | | | |

Порівняльний аналіз показав, що за тих самих характеристик як і у товарів конкурентів головною перевагою даного проекту є відсутність конкурентів на вітчизняному ринку, а також його нижча ціна, наявність цифрового виходу, можливість отримати якісне сервісне обслуговування на території України. Тому мій проект є конкурентоспроможним на ринку.

Останнім етапом ринкового аналізу можливості впровадження стартап є складання SWOT-аналізу. SWOT-аналіз містить в собі матрицю, яка складається з переліку сильних сторін, слабких сторін, загроз та можливостей. Дані для SWOT-аналізу використано на основі попередніх етапів.

В табл. 4.12 представлений SWOT-аналіз стартап-проекту.

Таблиця 4.12 – SWOT аналіз стартап-проекту

| | |
|---|---|
| <p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - відсутність вітчизняних конкурентів; - низька ціна; - висока якість; - наявність вихідного цифрового сигналу; - універсальність; - умови та простота використання | <p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - конкуренція з прямими закордонними фірмами; - недостатня відомість на місцевому ринку; - залежність вибору ціни від прибутку споживачів; - необхідність закупівлі компонентів приладу за кордоном, а отже залежність від курсу валют. |
| <p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - налагоджене виробництво; - сервісна підтримка споживачів; - зниження ціни за рахунок підтримки держави; - новизна; - робота за різних умов експлуатації | <p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - наявність закордонних фірм-конкурентів; - невелика кількість споживачів; - зміна рівня цін; - відсутність стартового капіталу; - нестабільна політична обстановка |

Ринкові загрози та можливості є прогнозованими результатами впливу факторів, які визначено на попередніх етапах. Проте наявність сильних сторін та незначущість слабких сторін може значно зменшити ймовірність здійснення даного прогнозу.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. Визначено ймовірність отримання ресурсів та строки реалізації по кожному з пунктів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| № | Альтернатива ринкової поведінки | Імовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|---|---|--------------------------------|-------------------|
| 1 | Виготовлення механічної частини приладу на вітчизняному обладнанні та закупівля компонентів електроніки закордоном | висока | 6 місяців |
| 2 | Виготовлення механічної частини приладу на вітчизняному обладнанні та розробка власної бази електронних комплектуючих приладу | середня | 24 місяці |

Обрано першу альтернативу ринкового впровадження, а саме виготовлення механічної частини приладу на вітчизняному обладнанні та закупівля компонентів електроніки закордоном. Дана альтернатива є більш вигідною, оскільки Україна не є перевіреною базою електронних компонентів, тому доцільно купувати їх закордоном. Також головною перевагою до вибору даної альтернативи є більш короткі терміни її реалізації.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробку ринкової стратегії необхідно розпочати з визначення стратегії охоплення ринку. Для цього визначимо цільову аудиторію потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| № | Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів | Готовність споживачів сприйняти продукт | Орієнтовний попит в межах цільової групи | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу у сегмент |
|--|--|---|--|---------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Приватні підприємства | так | високий | відсутня серед вітчизняних виробників | середня |
| 2 | Науково дослідні інститути та лабораторії | так | середній | відсутня серед вітчизняних виробників | середня |
| 3 | Державні підприємства | так | високий | відсутня серед вітчизняних виробників | середня |
| Які цільові групи було обрано: приватні та державні підприємства | | | | | |

Як результат було обрано в якості цільової групи приватні та державні підприємства, в яких є необхідність використовувати даний продукт. Вибір обґрунтовується тим, що саме ці організації можуть гарантувати більший прибуток. Було обрано стратегію диференційованого маркетингу, оскільки проект охоплює декілька сегментів, розробляючи для них окремі програми ринкового впливу.

Далі сформовано базову стратегію розвитку в обраних сегментах ринку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

| Обрана альтернатива розвитку проекту | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|--|--|--|---------------------------|
| Виготовлення механічної частини приладу на вітчизняному обладнанні та закупівля компонентів електроніки закордоном | Вітчизняний ринок за рахунок малої кількості вітчизняних конкурентів | - ціна приладу не більша за ціну конкурентів; - якість та точність приладу не поступається конкурентам. | Стратегія спеціалізації |

Було обрано стратегію спеціалізації, тому що дана стратегія передбачає сконцентрованість на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити весь ринок. Основною задачею стратегії спеціалізації є задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти. Дана стратегія була обрана за рахунок того, що немає великого обороту продукції на ринку через малу кількість споживачів та необхідність застосування приладу лише в галузі вимірювальної техніки[17].

Наступним кроком буде визначення базової стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| | | | |
|--|--|--|----------------------------------|
| Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурентів, і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
| закордоном – ні, на вітчизняному ринку – так | пошук нових споживачів | буде скопійовано деякі характеристики, а саме габарити, принцип роботи | Стратегія наслідування лідера |

Як базову, визначено стратегію наслідування лідера. Дана стратегія була обрана тому, що даний проект не має переваги по масштабах продажу порівняно з конкурентами. Також існує необхідність заощадження фінансового капіталу для подальшого розширення товарної бази та закріплення досягнутих позицій на ринку. Також такий вибір обумовлений перевагою в локалізації, а саме краще володіння місцевим ринком та знання потреб споживачів.

Взявши за основу вимоги споживачів до товару та виробника, а також взявши до уваги базову стратегію та стратегію конкурентної поведінки розроблено стратегію позиціонування (табл. 4.17), яка полягає у формуванні ринкової позиції.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

| | | | |
|--|---------------------------|--|--|
| Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту |
| - точність вимірювання; - якість; - простота використання; - доступна ціна; - універсальність. | Стратегія спеціалізації | оптимальне співвідношення ціна/якість | надійність, точність, доступність |

За базову стратегію розвитку було обрано стратегію спеціалізації, яка буде задовольняти потреби споживачів, такі як точність вимірювання, якість виконання, простота використання, доступна ціна та універсальність приладу. Даний проект буде вигравати на фоні конкурентів за рахунок досягнення оптимального співвідношення ціна/якість, а також за рахунок відсутності

прямих конкурентів на вітчизняному ринку. Проект позиціонує себе як такий, що має високу точність, надійність роботи та доступний ціновий діапазон.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для формування маркетингової концепції товару підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності. Ключові переваги концепції потенційного товару наведено в табл. 4.18.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами |
|---|-----------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | Точність | Точність вимірювання деформації 0,05% | Підвищення точності вимірювання за рахунок використання як механічних, так і прецизійних підсилювачів |
| 2 | Низька ціна | Оптимальне співвідношення ціна/якість | Зниження ціни за рахунок використання вітчизняного обладнання та державної підтримки |
| 3 | Простота використання | Повністю комплектований прилад | Споживач отримує прилад повністю зібраний. Його лише необхідно підключити до мережі та зняти цифровий сигнал |

Визначено перелік основних потреб та переваг над конкурентами, які гарантують високий рівень конкурентоспроможності. За рахунок ключових переваг товару і стратегії спеціалізації, яка спрямована на задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти, буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Тепер розробляється трирівнева маркетингова модель товару(табл. 4.19). Уточнюється ідея продукту, властивості, особливості його подання.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару | Сутність та складові | | |
|--|---|------|------------|
| I. Товар за задумом | Тензорезисторний датчик деформації з механічним підсиленням | | |
| II. Товар у реальному виконанні | Властивості/Характеристики | М/Нм | Вр/Тх/Тл/Е |
| | 1. Якість | М | Тх |
| | 2. Точність | М | Тх |
| | 3. Маса | Нм | Е |
| | 4. Габарити | Нм | Е |
| | 5. Цифровий вигідний сигнал | Нм | Тх |
| | 6. Гігроскопічність | М | Тх |
| | 7. Зручність використання | М | Е |
| | 8. Низька ціна | Нм | Вр |
| | Якість: ступінь захисту IP63 | | |
| | Пакування: Пластикова коробка, яка містить прилад та інструкцію | | |
| | Марка: DT by Ukraine + VM2 | | |
| III. Товар з підкріпленням | До продажу: гарантійні умови, консультація по вибору товару | | |
| | Після продажу: сервісне обслуговування, доставка та установка | | |
| За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування | | | |

На даному етапі було визначено основні властивості та характеристики товару у реальному виконанні, спосіб забезпечення якості за стандартом IP63, який передбачає ступінь захисту корпусу приладу від потрапляння пилу, та захист від дощу (вода ллється вертикально або під кутом до 60° до вертикалі). Визначено спосіб та склад пакування, його марку. Визначено, які супутні товари та послуги можуть йти з товаром до і після продажу. Підкріплення до товару дозволить споживачу отримати більш якісне обслуговування в вигляді сервісної підтримки під час встановлення приладу, або ж в разі його поломки. Споживач має змогу отримати гарантії якісної роботи за умови доставки та монтажу приладу фірмою постачальником. Компанія ж може отримати з цього прибуток, оскільки вартість на послуги не регламентується і визначається фірмою-виробником.

Даний проект слід захистити патентуванням ідеї, тому що це дозволить запобігти його неправомірне копіювання, або ж отримати прибуток, надавши право використання іншій компанії.

На основі рівня цін на товари замітники та товари аналоги, з урахуванням доходів цільової групи споживачів визначимо верхню та нижню границю встановлення ціни на даний товар.

Діапазон встановлення цін на товар представлено в табл. 4.20.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

| Рівень цін на товари замітники | Рівень цін на товари аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу |
|--------------------------------|------------------------------|--|---|
| 11 тис. грн. | 11 тис. грн. | високий | 8 – 11 тис. грн. |

Було проаналізовано рівень цін на товари аналоги та замітники, а також рівень цін на товари конкуренти. Оскільки в більшій кількості споживачі даного товару це великі компанії та державні підприємства, то можна заробити висновок, що рівень доходу цільової групи споживачів – високий. Отже, ціна на товар не перевищує ціновий діапазон на товари замітники та товари аналоги, що дозволить добре конкурувати за ціною як на вітчизняному ринку, так і на міжнародному. Більш точно ціновий діапазон встановлюється при проведенні фінансово-економічного аналізу проекту.

На даному етапі необхідно прийняти рішення про вибір системи збуту, глибини каналу збуту, вибору посередників.

Результати представлені в табл. 4.21.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

| Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
|---|--|-----------------------|---|
| Закупівля товару в малих кількостях | Своєчасне постачання товарів та сервісного обслуговування, надання гарантії, забезпечення відповідних умов транспортування | Канал нульового рівня | - торгівля через магазини; - торгівля через Інтернет; - Надання послуг через тестувальний офіс-магазин. |

Як канал збуту обрано канал нульового рівня, тому що виробник самостійно продає власний товар та формує власну базу клієнтів. Збут буде відбуватись через магазин виробника, Інтернет мережу (сайт виробника), тестувальний офіс-магазин, де споживач може отримати консультацію по вибору товару, а також протестувати його на лабораторному обладнанні.

Виходячи з попередньо обраних стратегії позиціонування, стратегію поведінки споживачів розроблено стратегію маркетингових комунікацій (табл. 4.22).

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

| Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікації, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування | Завдання рекламного повідомлення | Концепція рекламного звернення |
|--|--|--|--|---|
| Необхідність якісного товару за помірною ціною | Виставки, конференції, інтернет-форуми, публікації | Доступність товару, якість, помірна ціна | Запевнити у необхідності даного товару та у виборі саме цього підприємства | Висока якість, точність та надійність за ціною державного виробника |

Основною задачею маркетингових комунікацій є задача запевнити споживача у необхідності використання даного приладу саме цього підприємства. Прилад позиціонує себе, як високоякісний, точний, надійний за ціною державного виробника. Оскільки в наш час дуже розвинуто інформаційні

технології, які дозволяють швидко отримувати та поширювати інформацію, то для просування товару на ринку буде застосовано такі технології як інтернет-форуми, вебсайти, соціальні мережі, публікації у Інтернет виданнях(для донесення інформації до приватних підприємців). Не буде й нехтуватись паперовими носіями інформації, такими як технічні каталоги та брошури, якими будуть користуватися державні підприємства. Даний інформаційний матеріал можна побачити на технічних виставках, конференціях, в публікаціях наукових журналів[17].

4.6 Висновки

В результаті проведення маркетингового аналізу стартап проекту було визначено його головну ідею – Тензорезисторний датчик деформації з механічним підсилювачем. В даного стартап-проекту є можливість комерціалізації проекту, оскільки є попит на товар серед державних та приватних підприємств з великими прибутками, зростаюча динаміка ринку, та рентабельність, значення якої перевищує значення банківського відсотка на вкладення.

Даний проект є перспективним до впровадження незважаючи на деякі бар'єри входження, такі як наявність закордонних фірм-конкурентів, невелика кількість споживачів, зміна рівня цін за рахунок нестабільності курсу валют, відсутність стартового капіталу, нестабільна політична обстановка, яка може перешкоджати постачанню компонентів товару із закордону, оскільки достатньо буде прибутку від цільової аудиторії споживачів за рахунок відсутності конкурентів на вітчизняному ринку. Проте є і сильні сторони проекту такі як, відсутність вітчизняних конкурентів, низька ціна, висока якість, наявність вихідного цифрового сигналу, універсальність, умови та простота використання.

Визначено, що маємо монополістичну конкуренцію та глобальний рівень конкурентної. Головними силами впливу є споживачі та постачальники,

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 84 |

від яких залежить ціна на компоненти товарів, швидкість постачання в країну призначення та розмір поставок. Також споживачі вимагають оптимального співвідношення ціна/якість. Для досягнення конкурентоспроможності на міжнародному рівні необхідно весь час оновлювати продукцію, використовувати нові технології. Згідно проведеного аналізу проект має сильні сторони, такі як низька ціна з якістю, яка не поступається товарам конкурентів, використання вітчизняного обладнання, переваги за рахунок наявності цифрового виходу та можливості використання в різних умовах середовища. Отже з огляду на конкурентну ситуацію можна зробити висновок про те, що є можливість конкурувати на ринку.

Для досягнення необхідної мети необхідно дотримуватись такої альтернативи впровадження, як виготовлення механічної частини приладу на вітчизняному обладнанні та закупівля компонентів електроніки закордоном. Дана альтернатива є більш вигідною, оскільки Україна не є перевіреною базою електронних компонентів, тому доцільно купувати їх закордоном тим самим скоротити терміни її реалізації.

Було обрано стратегію диференційованого маркетингу, стратегію слідування лідеру та стратегію спеціалізації, для кращого розвитку проекту і досягнення поставленої задачі.

Після реалізації проекту необхідно весь час підтримувати рекламну кампанію через інтернет-форуми, вебсайти, соціальні мережі, публікації у Інтернет виданнях та брати участь у технічних виставках та тендерах.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 85 |

Загальні висновки

В магістерській дисертації було розглянуто аналоги тензорезисторних перетворювачів закордонних фірм Magtrol (США), Keli Electric Manufacturing (Китай), НВМ (Німеччина), Gefran (Італія), Zemic (Китай). Проведено підбір матеріалу пружного елемента, тензорезисторів, цифрового підсилювача та інтерфейсу передачі даних. Проведено розрахунок на основі електричної схеми, з якої було розраховано мінімально можливу товщину деформуючої ділянки, яка дорівнює 1,5(мм).

На основі структурної схеми перетворювача розраховано загальну чутливість приладу, яка дорівнює $S_0 = 1,965$, тобто підсилення деформації за такої конструкції на 96%.

Побудовано статичну та перехідну характеристику, амплітудо-частотну та фазочастотну характеристику перетворювача. Визначено залежність вихідного сигналу від матеріалу чутливого елемента, з якої видно, що матеріал 35ХГСА має добру чутливість та механічні властивості. З амплітудо-частотної характеристики визначили значення резонансної частоти за якої амплітуда максимальна і дорівнює 3,36, яка дорівнює $8,07 \cdot 10^4 \text{ (с}^{-1}\text{)}$. Також визначено ширину полоси пропускання, яка має значення $1,13 \cdot 10^5 \text{ (с}^{-1}\text{)}$. З перехідної функції визначено час встановлення сигналу $t_{уст} = 75,6 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$, час перехідного процесу $t_m = 37,8 \cdot 10^{-6} \text{ (с)}$ та перегулювання 39%, що є допустимим.

Розглянуто способи перевірки нульового балансу, цілісності ізоляції та тензометричного моста Уінстона, перевірки під навантаженням. Розглянуто методику градуювання тензометричного датчика двома способами, а саме градуювання за допомогою еталонної консольної балки та електроградуювання еталонним резистором.

Проведено розрахунок надійності, в результаті якого визначено, що ймовірність відсутності раптових відмов становить $P_v = 0,97$. Були визначені величина абсолютної похибки вимірювання, яка становить 2,52(мВ) на 71(мВ)

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 86 |

вихідної напруги, та величина відносної похибки вимірювання, яка дорівнює 2,4%, що є допустимим.

Проведено експериментальне дослідження тензорезисторного датчика при дії на нього навантаження. Навантаження здійснювалось за допомогою розривної машини TIRA test 2300, діапазон навантажень якої від мінус 10^5 (Н) до плюс 10^5 (Н).

Розроблено стартап проект, який є перспективним до впровадження незважаючи на деякі бар'єри входження, такі як наявність закордонних фірм-конкурентів, невелика кількість споживачів, зміна рівня цін за рахунок нестабільності курсу валют, відсутність стартового капіталу, нестабільна політична обстановка, яка може перешкоджати постачанню компонентів товару із закордону, оскільки достатньо буде прибутку від цільової аудиторії споживачів за рахунок відсутності конкурентів на вітчизняному ринку. Проте є і сильні сторони проекту такі як, відсутність вітчизняних конкурентів, низька ціна, висока якість, наявність вихідного цифрового сигналу, універсальність, умови та простота використання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД П171мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 87 |

Перелік посилань

1. Gefran SL76/80-AA: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gefran.com/en/products/445-sl76-80-aa-link-sensor-with-analog-amplifier>.
2. HBM SLB700A Strain Transducer for Measuring High Forces: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/2515/slb700a-strain-transducer-for-measuring-high-forces/>.
3. Magtrol KG-05: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.magtrol.com/datasheets/kg05.pdf>.
4. Вікторова Н.В., Зайцев В.М. Пружний елемент цифрового перетворювача відносних деформацій з механічним підсилювачем//Збірник праць XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених: «Ефективність інженерних рішень у Приладобудуванні», 4-5 грудня 2018 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – 434 с.
5. ГОСТ4543-71 Прокат легированной конструкционной стали. Технические условия.–Введ. 01.01.73.– М.: Издательство стандартов, 1973. – 40 с.
6. Тензорезисторы: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_5.aspx
7. Тензорезисторы №1/ Zemic, – 2014. – 53 с.
8. Клея для наклейки тензорезисторов: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zemic-tenzo.com/articles-tenzo/glue_tenzo/
9. HBM Digital AED Transducer Electronics : [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/2561/aed-digital-transducer-electronics/>.
10. Интерфейсы для обмена данными для промышленного оборудования и промышленной электроники: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.softelectro.ru/interface.html>

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
| | | | | | МД ПІ71мп.03.00ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 88 |

11. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие /В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
12. Браславский Д.А. Приборы и датчики лтательных аппаратов: учебник для вузов/ Д. А. Брацлавский – М.: Машиностроение, 1970. – 391 с.
13. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник (для студентів спеціальності 7.092202 “Електричний транспорт”) Авт. Сорока К.О. – Харків, ХНАМГ, 2006 – 187 с.
14. Выгода Ю.А., Осадчий Е.П., Тихонов А.И. Проектирование измерительных элементов (датчиков) систем автоматики: учеб. пособие. – Пенза, 1977.
15. Тензодатчики. Общие сведения и принцип работы: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asvik.kiev.ua/ru/articles/5#>
16. Как провести диагностику тензодатчика : [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zemic.com.ua/articles/ru/188/4>
17. Рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД П171мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 89 |

Додатки

Додаток А

Дані експериментального дослідження

Таблиця А.1 – Дані експериментального дослідження

| Цикл навантаження | Зміщення | Сила | РКП1 | РКП2 | РКП3 |
|-------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,00763 | 0,26887 | -0,1680 | 0,3815 | -0,4571 |
| | 0,00763 | 0,54018 | -0,1581 | 0,3913 | -0,4572 |
| | 0,00732 | 0,83895 | -0,1450 | 0,4040 | -0,4569 |
| | 0,00793 | 1,283 | -0,1320 | 0,4165 | -0,4569 |
| | 0,00793 | 1,57384 | -0,1192 | 0,4287 | -0,4573 |
| | 0,00763 | 1,99652 | -0,1095 | 0,4378 | -0,4569 |
| | 0,00824 | 2,69234 | -0,0875 | 0,4581 | -0,4570 |
| | 0,00793 | 2,95907 | -0,0755 | 0,4692 | -0,4572 |
| | 0,00854 | 3,33903 | -0,0644 | 0,4786 | -0,4575 |
| | 0,00854 | 3,57219 | -0,0542 | 0,4879 | -0,4574 |
| | 0,00885 | 4,14014 | -0,0402 | 0,5009 | -0,4573 |
| | 0,00916 | 4,28358 | -0,0343 | 0,5065 | -0,4571 |
| | 0,00885 | 4,56496 | -0,0262 | 0,5138 | -0,4570 |
| | 0,00916 | 4,65712 | -0,0232 | 0,5169 | -0,4572 |
| | 0,00916 | 4,80392 | -0,0181 | 0,5222 | -0,4572 |
| | 0,00977 | 4,91317 | -0,0142 | 0,5260 | -0,4573 |
| | 0,00946 | 5,09384 | -0,0063 | 0,5343 | -0,4574 |
| | 0,00946 | 5,28245 | -0,0009 | 0,5398 | -0,4640 |
| | 0,00977 | 5,403 | 0,0440 | 0,5451 | -0,4765 |
| | 0,00946 | 5,5797 | 0,0095 | 0,5506 | -0,4762 |
| | 0,00946 | 5,75732 | 0,0145 | 0,5555 | -0,4750 |
| | 0,00977 | 5,927 | 0,0208 | 0,5618 | -0,4743 |
| | 0,00977 | 6,06464 | 0,0258 | 0,5670 | -0,4742 |
| | 0,01038 | 6,19831 | 0,2970 | 0,5711 | -0,4739 |
| | 0,01007 | 6,33259 | 0,0334 | 0,5751 | -0,4804 |
| | 0,01038 | 6,57735 | 0,4160 | 0,5843 | -0,4789 |
| | 0,01099 | 6,798 | 0,4750 | 0,5908 | -0,4799 |
| | 0,01129 | 7,05771 | 0,5530 | 0,5997 | -0,4794 |
| | 0,01129 | 7,14682 | 0,5770 | 0,6021 | -0,4795 |
| | 0,01129 | 7,20664 | 0,6000 | 0,6047 | -0,4801 |
| 0,0116 | 7,28813 | 0,6230 | 0,6073 | -0,4794 | |
| 0,01129 | 7,34336 | 0,6420 | 0,6098 | -0,4788 | |
| 0,0119 | 7,4984 | 0,6720 | 0,6138 | -0,4774 | |

Продовження табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---------|---------|----------|--------|---------|
| 1 | 0,0119 | 7,55028 | 0,6950 | 0,6164 | -0,4769 |
| | 0,0119 | 7,63329 | 0,7180 | 0,6189 | -0,4762 |
| | 0,01221 | 7,71691 | 0,7400 | 0,6216 | -0,4753 |
| | 0,01221 | 7,77764 | 0,7650 | 0,6246 | -0,4757 |
| | 0,01251 | 7,91345 | 0,7960 | 0,6287 | -0,4761 |
| | 0,01282 | 7,97021 | 0,8190 | 0,6314 | -0,4760 |
| | 0,01251 | 8,02789 | 0,8410 | 0,6340 | -0,4760 |
| | 0,01282 | 8,18995 | 0,8930 | 0,6398 | -0,4762 |
| | 0,01312 | 8,24305 | 0,9090 | 0,6418 | -0,4766 |
| 2 | 0,00793 | 0,26337 | -00.1881 | 0,4014 | -0,4612 |
| | 0,00763 | 0,26948 | -00.1870 | 0,4026 | -0,4620 |
| | 0,00763 | 0,32197 | -0,1862 | 0,4033 | -0,4624 |
| | 0,00763 | 0,32289 | -0,1859 | 0,4037 | -0,4619 |
| | 0,00763 | 0,36378 | -0,1845 | 0,4049 | -0,4618 |
| | 0,00793 | 0,41169 | -0,1820 | 0,4073 | -0,4617 |
| | 0,00763 | 0,4828 | -0,1772 | 0,4118 | -0,4617 |
| | 0,00793 | 0,8948 | -0,1616 | 0,4267 | -0,4611 |
| | 0,00793 | 1,18656 | -0,1551 | 0,4324 | -0,4613 |
| | 0,00824 | 1,33 | -0,1484 | 0,4400 | -0,4619 |
| | 0,00824 | 1,62236 | -0,1418 | 0,4461 | -0,4623 |
| | 0,00824 | 1,77343 | -0,1321 | 0,4552 | -0,4624 |
| | 0,00824 | 2,06183 | -0,1256 | 0,4613 | -0,4623 |
| | 0,00824 | 2,20496 | -0,1190 | 0,4676 | -0,4622 |
| | 0,00854 | 2,49886 | -0,1126 | 0,4736 | -0,4627 |
| | 0,00854 | 2,64199 | -0,1060 | 0,4797 | -0,4631 |
| | 0,00854 | 3,07413 | -0,0902 | 0,4947 | -0,4621 |
| | 0,00854 | 3,21879 | -0,0836 | 0,5006 | -0,4620 |
| | 0,00885 | 3,36161 | -0,0771 | 0,5066 | -0,4614 |
| | 0,00885 | 3,6436 | -0,0706 | 0,5126 | -0,4612 |
| | 0,00885 | 3,78765 | -0,0613 | 0,5214 | -0,4618 |
| | 0,00885 | 4,06568 | -0,0549 | 0,5273 | -0,4616 |
| | 0,00946 | 4,48073 | -0,0426 | 0,5381 | -0,4622 |
| | 0,00916 | 4,6147 | -0,0366 | 0,5439 | -0,4627 |
| | 0,00916 | 4,89273 | -0,0272 | 0,5524 | -0,4624 |
| | 0,00885 | 5,03342 | -0,0212 | 0,5582 | -0,4623 |
| | 0,00946 | 5,30839 | -0,0149 | 0,5640 | -0,4633 |
| | 0,00946 | 5,44481 | -0,0087 | 0,5693 | -0,4641 |
| | 0,00946 | 5,71917 | -0,0029 | 0,5754 | -0,4644 |
| | 0,00946 | 5,85223 | 0,0035 | 0,5811 | -0,4647 |

Продовження табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2 | 0,00946 | 5,99139 | 0,0126 | 0,5895 | -0,4643 |
| | 0,00946 | 6,26179 | 0,0187 | 0,5951 | -0,4645 |
| | 0,00977 | 6,52944 | 0,0249 | 0,6008 | -0,4648 |
| | 0,00977 | 6,6628 | 0,0307 | 0,6066 | -0,4648 |
| | 0,00977 | 6,92953 | 0,0401 | 0,6152 | -0,4648 |
| | 0,00977 | 7,05985 | 0,0461 | 0,6205 | -0,4647 |
| | 0,01007 | 7,32017 | 0,0514 | 0,6261 | -0,4645 |
| | 0,01007 | 7,44957 | 0,0575 | 0,6314 | -0,4644 |
| | 0,01007 | 7,82678 | 0,0687 | 0,6421 | -0,4640 |
| | 0,01007 | 7,94336 | 0,0739 | 0,6471 | -0,4638 |
| | 0,01007 | 8,17438 | 0,0815 | 0,6544 | -0,4630 |
| 3 | 0,00763 | 0,26643 | -0,1891 | 0,4064 | -0,4824 |
| | 0,00763 | 0,30793 | -0,1873 | 0,4082 | -0,4818 |
| | 0,00763 | 0,32228 | -0,1873 | 0,4084 | -0,4812 |
| | 0,00763 | 0,32289 | -0,1869 | 0,4087 | -0,4805 |
| | 0,00763 | 0,37629 | -0,1846 | 0,4108 | -0,4798 |
| | 0,00793 | 0,52675 | -0,1814 | 0,4140 | -0,4793 |
| | 0,00793 | 0,66225 | -0,1749 | 0,4199 | -0,4787 |
| | 0,00793 | 0,80874 | -0,1654 | 0,4289 | -0,4779 |
| | 0,00793 | 1,09622 | -0,1590 | 0,4348 | -0,4778 |
| | 0,00824 | 1,38585 | -0,1525 | 0,4408 | -0,4775 |
| | 0,00824 | 1,53203 | -0,1436 | 0,4499 | -0,4770 |
| | 0,00793 | 1,67821 | -0,1368 | 0,4559 | -0,4775 |
| | 0,00793 | 1,96875 | -0,1273 | 0,4648 | -0,4785 |
| | 0,00824 | 2,11554 | -0,1207 | 0,4708 | -0,4778 |
| | 0,00824 | 2,40883 | -0,1109 | 0,4802 | -0,4771 |
| | 0,00854 | 2,55806 | -0,1045 | 0,4862 | -0,4768 |
| | 0,00854 | 2,85195 | -0,0980 | 0,4923 | -0,4764 |
| | 0,00854 | 3,13883 | -0,0885 | 0,5013 | -0,4756 |
| | 0,00854 | 3,27769 | -0,0821 | 0,5073 | -0,4749 |
| | 0,00885 | 3,56456 | -0,0728 | 0,5159 | -0,4750 |
| | 0,00916 | 3,84472 | -0,0666 | 0,5217 | -0,4753 |
| | 0,00854 | 3,97992 | -0,0575 | 0,5303 | -0,4752 |
| | 0,00916 | 4,25916 | -0,0512 | 0,5362 | -0,4751 |
| 0,00885 | 4,54176 | -0,0420 | 0,5448 | -0,4758 | |
| 0,00885 | 4,67788 | -0,0359 | 0,5507 | -0,4757 | |

Продовження табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---------|---------|---------|--------|---------|
| 3 | 0,00916 | 4,95407 | -0,0268 | 0,5592 | -0,4755 |
| | 0,00916 | 5,23026 | -0,0209 | 0,5648 | -0,4751 |
| | 0,00916 | 5,36882 | -0,0115 | 0,5734 | -0,4747 |
| | 0,00946 | 5,64165 | -0,0055 | 0,5789 | -0,4751 |
| | 0,00946 | 5,91632 | 0,0011 | 0,5849 | -0,4752 |
| | 0,00916 | 6,05518 | 0,0100 | 0,5935 | -0,4754 |
| | 0,00946 | 6,32649 | 0,0162 | 0,5992 | -0,4752 |
| | 0,00916 | 6,46413 | 0,0251 | 0,6075 | -0,4748 |
| | 0,00977 | 6,73544 | 0,0310 | 0,6128 | -0,4749 |
| | 0,01007 | 6,99881 | 0,0396 | 0,6210 | -0,4747 |
| | 0,00977 | 7,12699 | 0,0454 | 0,6263 | -0,4758 |
| | 0,00977 | 7,38243 | 0,0536 | 0,6341 | -0,4767 |
| | 0,00977 | 7,63543 | 0,0591 | 0,6393 | -0,4768 |
| | 0,01007 | 7,75414 | 0,0670 | 0,6468 | -0,4762 |
| | 0,01007 | 7,987 | 0,0722 | 0,6519 | -0,4759 |
| | 0,01007 | 8,10755 | 0,0798 | 0,6592 | -0,4753 |
| | 0,01007 | 8,33613 | 0,0849 | 0,6641 | -0,4751 |

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД ПІ71мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 94 |

Додаток Б
Специфікація складального кресленика

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | <i>МД П171мп.03.00ПЗ</i> | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 95 |

| Формат | Зона | Поз. | Позначення | Найменування | Кільк. | Примітка |
|--------|------|------|-------------------|---|--------|----------|
| | | | | <u>Документація</u> | | |
| A2 | | | МД.ПІ71мп.03.00СК | Цифровий перетворювач відносних деформацій | | |
| | | | | <u>Деталі</u> | | |
| A2 | 1 | | МД.ПІ71мп.03.001 | Пружний елемент | 1 | |
| A4 | 2 | | МД.ПІ71мп.03.002 | Кришка | 1 | |
| A4 | 3 | | МД.ПІ71мп.03.003 | Гайка обжимна | 1 | |
| A4 | 4 | | МД.ПІ71мп.03.004 | Цанга | 1 | |
| A4 | 5 | | МД.ПІ71мп.03.005 | Бабишка | 2 | |
| | | | | <u>Стандартні вироби</u> | | |
| | 6 | | | Гвинт В2.М2-6qx6-22.36.016 ГОСТ 17473-80 | 2 | |
| | 7 | | | Гвинт В2.М2-6qx12-22.36.016 ГОСТ 17473-80 | 4 | |
| | 8 | | | Гвинт М5-6qx16.10935ХГСА.05 ГОСТ 11738-84 | 4 | |
| | 9 | | | Наконечник ПІ 0.5-2.2-К-ЛТ-05 ГОСТ 2202.6-82 | 2 | |
| | 10 | | | Шайба 2,5x1.СТ ОСТ 4.894.002-99 | 2 | |

| | | | | | |
|---|------|-----------|--------|-------|---------|
| МД.ПІ71мп.03.000СП | | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | |
| Розроб. | | Вікторова | | | |
| Перевірив | | Зайцев | | | |
| Н.Контр. | | | | | |
| Затв. | | Зайцев | | | |
| Тензометрична система з механічними підсилювачами деформацій | | | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| | | | | 1 | 2 |
| НТУУ "КПІ" ім. Сікорського ЛБФ, ПІ-71мп | | | | | |

