

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій КИРИЧУК**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

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

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

**на тему: «Автоматична транспортно-пакувальна лінія з системою  
вагового контролю»**

Виконав :

студент IV курсу, групи ПМ-п01

Демерза Назар Валерійович \_\_\_\_\_

Керівник:

Старший викладач

Зайцев Віктор Миколайович \_\_\_\_\_

Консультант з назва розділу:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент, кандидат технічних наук

Козир Олег \_\_\_\_\_

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

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року



**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Автоматична транспортно-пакувальна лінія з**  
**системою вагового контролю»**

Київ – 2023 року

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

Факультет Приладобудівний факультет  
Кафедра Автоматизації та систем неруйнівного контролю  
Рівень вищої освіти – Перший (бакалаврський)  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (Комп'ютерно-інтегровані технології проектування приладів)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Юрій КИРИЧУК  
«   »     20    р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт студенту**

Демерзі Назару Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Автоматична транспортно-накувальна лінія з системою вагового контролю,

керівник проєкту Зайцев Віктор Миколайович,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «   »     20    р. №   

2. Термін подання студентом проєкту 20 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту: 3.1. Об'єкт контролю – рулони тиссо-паперу; 3.2. Габаритні розміри, максимальні, мм -ширина-2700; діаметр-1500 ; 3.3. Границі контрольних зважувань, кг – найбільша Max= 1800; найменша Min= 20; 3.4. Тип ваговимірювального перетворювача - тензорезисторний з кільцевим пружним елементом; 3.5. Границя відносних приведених похибок перетворювача  $\pm 0,05$  % кількість повірочних поділок  $n=2000$ ; 3.6. Чутливість перетворювача РКП=1,5 мВ/В.

4. Зміст пояснювальної записки 4.1. Огляд та аналіз існуючих конструкцій автоматичних ліній; 4.2. Розробка алгоритму функціонування транспортно-

пакувальної лінії з системою вагового контролю; 4.3.Розробка принципів схем тензорезисторного перетворювача з кільцевим пружним елементом; 4.4. Розрахунок метрологічних характеристик тензорезисторного ваговимірювального датчика;

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1 Складальний кресленик лінії-2; арк. Ф А1. 5.2.Лист пристрій зважування – 1арк. ф А1; 5.3.Лист пакувальний верстат - 1 арк.ф А1;

#### 6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 30 квітня 2023 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Одержати у керівника дипломного проекту (ДП) затверженого завідувачем кафедри завдання на ДП	30 квітня 2023 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки ДП	06 червня 2023 р.	
3.	Виконання технологічного розділу ДП, передача на перевірку та одержання підпису консультанта	06 червня 2023 р.	
4.	Виконання графічних матеріалів ДП	10 червня 2023 р.	
5.	Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгука на ДП	12 червня 2023 р.	
6.	Одержання рецензії на ДП	15 червня 2023 р.	
7.	Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	16 червня 2023 р.	
8.	Подання ДП, відгука та рецензії в екзаменаційну комісію університету	16 червня 2023 р.	
9.	Захист дипломного проекту в екзаменаційній комісії університету	19 червня 2023 р.	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Демерза Н.В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_

(підпис)

Зайцев В.М.

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт складається зі вступу, 3 розділів, висновку, списку використаної літератури і 4-ох додатків. Робота виконана на 60 сторінках і має 23 рисунків, 3 таблиці та 32 формули.

Ціль даного дипломного проєкту розробка автоматичної транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю.

Для реалізації поставлених задач було зроблено:

- 1) Аналіз вже існуючих пакувальних ліній та систем вагового контролю да детальний їх опис;
- 2) Розробка алгоритму дії такої лінії з усіма можливими проблемами, що можуть виникнути;
- 3) Розрахунок та моделювання тензорезисторного датчика, що може використовуватись в таких лініях для контрольних зважувань готової продукції.

## ABSTRACT

The diploma project consists of an introduction, 3 chapters, a conclusion, a list of used literature and 4 appendices. The work is completed on 60 pages and has 23 figures, 3 tables and 32 formulas.

The goal of this diploma project is the development of an automatic transport and packaging line with a weight control system.

To implement the set tasks, the following was done:

- 1) Analysis of already existing packaging lines and weight control systems and their detailed description;
- 2) Development of an algorithm for the operation of such a line with all possible problems that may arise;
- 3) Calculation and modeling of the strain gauge that can be used in such lines for control weighing of finished products.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	9
Вступ .....	10
1. Огляд та аналіз існуючих транспортно-пакувальних ліній з системою вагового контролю .....	12
1.1. Загальні відомості та види транспортно-пакувальних ліній .....	12
1.2. Системи вагового контролю на підприємствах .....	16
2. Розробка алгоритму дій транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю .....	19
2.1. Перевантаження з КП на КВП та рух візка КВП до ПЗ .....	19
2.2. Перевантаження з КВП на ПЗ в автоматичному режимі .....	20
2.3. Перевантаження рулону з ПЗ на ВП .....	21
2.4. Початок упаковки рулону .....	21
2.5. Осьова обмотка рулону .....	22
2.6. Тангенційна обмотка рулону .....	22
2.7. Зупинка упаковки .....	23
2.8. Керування приводами ВП в ручному режимі .....	24
2.9. Перевантаження рулону з конвеєра ВП на буферний конвеєр .....	24
2.10. Перевантаження рулону з БК у ліфт .....	25
2.11. Управління конвеєрами другого поверху у ручному режимі .....	26
2.12. Рух ліфта в автоматичному та ручному режимах .....	26
2.13. Вивантаження рулону з ліфта та рух візка КНП до КПН1 .....	27
2.14. Рух візка КНП в автоматичному режимі .....	28
3. Проектування ваговимірювального тензорезистонного перетворювача .....	29
3.1. Вибір датчика та обґрунтування вибору конструкції пружного елемента .....	29
3.2. Розробка структурної та функціональної схем .....	43
3.3. Розрахунок геометричних параметрів ПЕ .....	45
3.4. Розрахунок основних характеристик датчика .....	47
3.5. Розрахунок схеми компенсації температурних похибок .....	53
3.6. Аналіз точності .....	58
Висновок .....	60
Література .....	61

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Автоматична транспортно- пакувальна лінія з</i>	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		<i>Демерза Н.В.</i>				6	60	
Перевір.		<i>Зайцев В.М.</i>						
Реценз.						<b>ПБФ, ПМ-п01</b>		
Н. Контр.								
Затверд.								



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БК – буферний конвеєр;  
КВП – конвеєр верхній пересувний;  
КНП – конвеєр нижній пересувний;  
КП – конвеєр приймальний;  
ПЗ – пристрій зважувальний;  
ВП – верстат пакувальний;  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;  
РКІ – рідкокристалічний індикатор;  
АСУ – автоматизована система управління;  
ПДС – пристрій для спуску;  
КПП – конвеєр нижній приймальний;  
ТПЛСВК - транспортно-пакувальна лінія з системою вагового контролю;  
ПЕ – пружний елемент;  
ПЧЕ – пружний чутливий елемент;  
ПКП – початковий коефіцієнт передачі;  
РКП – робочий коефіцієнт передачі;  
ТКО – температурний коефіцієнт опору.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		9

## Вступ

У сучасних умовах промисловості автоматизація виробничих процесів стає все більш важливою для підприємств. Вона дозволяє забезпечити ефективність, точність та швидкість виконання завдань, а також підвищити загальну якість продукції. Одним із ключових аспектів автоматизації є розробка транспортно-пакувальних ліній з системою вагового контролю.

Метою даного дипломного проекту є розробка автоматичної транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю, яка забезпечуватиме ефективне пакування продукції та контроль за її вагою. Цей проєкт має на меті створити сучасне та надійне обладнання, яке відповідатиме потребам сучасної промисловості та забезпечуватиме високу якість пакування продукції.

Розробка автоматичної транспортно-пакувальної лінії передбачає впровадження сучасних технологій та рішень, таких як вагові сенсори, автоматичні системи керування та програмне забезпечення для контролю процесу пакування та вимірювання ваги продукції. Така система дозволить автоматично контролювати вагу продукції під час проходження через лінію та реагувати на будь-які відхилення від заданих параметрів.

В результаті реалізації даного дипломного проєкту очікується досягнення наступних результатів: розробка функціонального прототипу транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю, перевірка його роботи на реальних зразках продукції та оцінка ефективності та надійності системи. Такий прототип може бути подальшою основою для впровадження подібних систем на промислових підприємствах, що дозволить покращити якість та ефективність їх виробничих процесів.

Цей дипломний проєкт має на меті не тільки розробку функціональної транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю, але й проведення досліджень, впровадження оптимальних алгоритмів та технологій,

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		10

що сприятимуть покращенню якості продукції та забезпеченню заданих вагових параметрів.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

# 1. Огляд та аналіз існуючих транспортно-пакувальних ліній з системою вагового контролю

## 1.1. Загальні відомості та види транспортно-пакувальних ліній

На підприємствах може бути різна кількість транспортних ліній, в залежності від їх виду діяльності та потреб. Транспортна лінія - це система, яка забезпечує переміщення матеріалів, товарів або людей в межах підприємства.

Транспортні лінії можуть бути внутрішніми або зовнішніми. Внутрішні транспортні лінії служать для переміщення матеріалів або товарів в межах підприємства, наприклад, від складу до виробничої лінії або між різними виробничими ділянками. Зовнішні транспортні лінії використовуються для транспортування товарів з підприємства до клієнтів або постачальників, або для забезпечення зв'язку з іншими транспортними мережами, наприклад, залізницею або автодорогами.

Транспортні лінії на підприємстві можуть бути організовані різними способами. Наприклад, це можуть бути конвеєри, рухомі стрічки або лінії роликівих транспортерів для переміщення товарів по виробничим приміщенням. Також транспортні лінії можуть включати розкладні столи, автоматизовані системи переміщення товарів або спеціальні пристрої для підйому і переміщення великих вантажів.

Мета транспортних ліній на підприємстві полягає в оптимізації процесів переміщення матеріалів або товарів, зменшенні часу та затрат на їх транспортування, підвищенні ефективності виробничих процесів та забезпеченні безпеки працівників.

На даний момент існують різноманітні автоматичні транспортно-пакувальні лінії, які використовуються в різних галузях промисловості. Далі приведемо кілька прикладів.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		12

Автоматична лінія фасування харчових продуктів [3]: Ця лінія включає автоматичні транспортери для переміщення продуктів від початкової точки до кінцевого пункту фасування. Вона також включає автоматичні системи вимірювання, дозування, фасування і упаковки продуктів.

Автоматична лінія пакування виробів:

Ця лінія призначена для автоматичного пакування виробів відповідно до заданих параметрів. Вона може включати автоматичні розкладні столи, роботизовані системи захоплення виробів, системи управління пакуванням і закриттям упаковки.

Загальний вигляд системи наведено на рис. 1.1



Рисунок 1.1 – Лінія автоматичного фасування борошна

Принцип роботи: на транспортно-пакувальній лінії пакети автоматично підбираються зі складу, розгортаються та подаються на позицію автоматичного наповнення виробом. Під час подальшого руху пакет закривається, верхній шов складається та приклеюється до тіла пакета за допомогою гребінця. Потім пакети проходять на лінію групового упакування, де вони формуються у блоки. Отриманий блок обгортається термоусадочною плівкою й проходить через термотунель.

Автоматична лінія складання та упаковки коробок [2]: Ця лінія використовується для автоматичного складання та запечатування коробок з

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		13

продуктами або матеріалами. Вона може включати автоматичні системи формування коробок, транспортери для переміщення коробок, системи закриття коробок і маркування.

Загальний вигляд системи наведено на рис. 1.1.



Рис 1.2 – Автоматичний формувальник коробів

Призначення: дана автоматична машина призначена для формування картонних коробок з заготовок, заклеювання дна та подальшого наповнення продукцією. Для заклеювання дна використовується скотч шириною 48 мм, 60 мм або 75 мм. Вона підходить для створення та запечатування картонних коробок різних розмірів від 200\*150\*100 мм до 450\*400\*350 мм.

Якщо розмір коробки змінюється, оператор може вручну відрегулювати машину, що займає десь в середньому до 5 хвилин. Машина використовує вертикальне завантаження заготовок, дозволяючи додавати їх у накопичувач у будь-який момент без зупинки роботи машини. Крім того, машина може мати різне спрямування подачі коробок - зліва направо або навпаки, в залежності від вимог і умов розташування лінії.

Автоматична лінія монтажу [1]: Ця лінія використовується для автоматичного монтажу складних виробів, наприклад, електроніки або автомобілів. Вона включає роботизовані станції збирання, системи подачі

компонентів, автоматичні зварювальні станції та інші процеси збирання і кріплення деталей.



Рис. 1.3 – Автоматична лінія поверхневого монтажу друкованих плат

У складі автоматичної лінії поверхневого монтажу застосовується таке обладнання:

- Автомат трафаретного друку LP1L (Samsung): Він використовується для нанесення паяльної пасти за допомогою трафаретів. Автомат оснащений рамою для трафаретів з пневматичним натягом трафаретів (LPKF). Це дозволяє виконувати нанесення паяльної пасти в автоматичному режимі з високою швидкістю, точністю та повторюваністю.

- Універсальний автомат-установник SM421 (Samsung): Використовується для встановлення компонентів поверхневого монтажу. Має високу продуктивність до 21000 компонентів на годину за стандартом IPC9850. Автомат працює з компонентами у різних упаковках, таких як стрічки, пенали, палети, і має широкий діапазон розмірів корпусів від чіпів 0201 до BGA 42\*42 мм. Він також може обробляти плати з розмірами від 65\*60

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

**ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ**

Арк.

15

мм до 400\*400 мм. Точність установки складає  $\pm 50$  мкм для чіпів та  $\pm 30$  мкм для QFP.

- Піч конвекційного оплавлення SEHO GoReflow 2.3: Використовується для оплавлення паяльної пасти. Ця 7-зонна піч підготовлена під Pb-free технологічний процес, що відповідає екологічним вимогам. Вона забезпечує рівномірне та контрольоване нагрівання компонентів.

- Пристрій для зняття термопрофілів KIC Explorer: Використовується для контролю та налагодження температурного режиму паяння. Цей 7-канальний пристрій дозволяє отримувати дані про температуру в різних точках печі, що допомагає забезпечити оптимальні умови оплавлення паяльної пасти.

Це обладнання дозволяє забезпечити автоматизований процес поверхневого монтажу з високою точністю, продуктивністю та якістю.

Це лише кілька прикладів автоматичних транспортно-пакувальних ліній, але насправді їх існує багато різних типів, призначених для вирішення різних завдань у різних галузях промисловості.

## 1.2. Системи вагового контролю на підприємствах

Системи вагового контролю на підприємствах є спеціальними технологічними системами, які використовуються для вимірювання маси або навантажень об'єктів. Вони зазвичай включають в себе вагові перетворювачі, пристрої для перетворення сигналів та візуалізацію результатів і програмне забезпечення для обробки та аналізу даних.

Вагові перетворювачі є ключовими компонентами систем вагового контролю і використовуються для вимірювання маси об'єктів. Вони перетворюють фізичне навантаження (вагу) в електричний сигнал, який потім може бути оброблений та інтерпретований системою вагового контролю. Вагові перетворювачі можуть мати різні види та функції залежно від їхньої

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		16



конструкції та мети застосування. Найбільш поширені типи вагових перетворювачів для індустріального застосування наведені нижче.

1) Кондуктивні перетворювачі: Ці перетворювачі використовуються для вимірювання ваги на основі зміни електричного опору. Вони містять дві електроди, між якими проходить струм. Зміна опору відбувається при згині або деформації перетворювачі, що дозволяє визначити масу об'єкта.

2) Пружинні перетворювачі: Ці перетворювачі використовують механічні пружини для вимірювання сили - ваги об'єкта. Зміна геометричних розмірів пружини відбувається при навантаженні, і це може бути виміряно за допомогою датчиків переміщення.

3) Механо-електричні перетворювачі: Це один з найпоширеніших типів вагових сенсорів. Вони використовуються для вимірювання деформації матеріалу, яка виникає при навантаженні. Тензодатчики містять тонкі провідники або плівки, які змінюють свій опір або напругу при навантаженні, що дозволяє визначити масу об'єкта.

4) Конденсаторні перетворювачі: Ці сенсори для вимірювання ваги засновані на залежності ємності конденсатора від відстані між пластинами. Збільшення навантаження призводить до зміни відстані між пластинами конденсатора, що впливає на ємність і може бути подальшо інформаційно перетворено .

Функції вагових перетворювачів включають точне вимірювання маси або ваги об'єктів, передачу вимірних даних до систем вагового контролю, компенсацію впливу зовнішніх факторів (температури, вологості тощо), стійкість до шуму і вібрацій, а також високу швидкість і повторюваність вимірювань.

Системи вагового контролю використовуються в різних галузях і можуть мати різноманітні застосування. Основна мета використання таких систем полягає у забезпеченні точності, надійності та ефективності процесів зважування на підприємстві.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		17

Деякі типові застосування систем вагового контролю включають:

- **Контроль якості:** Системи вагового контролю використовуються для перевірки відповідності ваги виробів або матеріалів до заданих стандартів. Вони можуть автоматично відсікати недосягнуті об'єкти або сповістити про неправильну вагу, що дозволяє підприємству забезпечити якість своєї продукції.

- **Контроль виробничих процесів:** Системи вагового контролю використовуються для контролю ваги матеріалів, що використовуються у виробництві, та забезпечення правильної дозування або змішування речовин. Це допомагає підприємству уникнути перевитрат або недостачі матеріалів і підтримувати стабільність виробничих процесів.

- **Інвентаризація і контроль складу:** Системи вагового контролю дозволяють підприємствам точно виміряти масу товарів або матеріалів, що входять або виходять зі складу. Це допомагає вести облік запасів, виявляти втрати або недосконалість в процесах управління складськими запасами.

- **Вимірювання маси вантажів:** Системи вагового контролю використовуються для точного вимірювання маси вантажів, що надходять або відправляються з підприємства. Це особливо корисно в галузі транспорту та логістики, де точність ваги є важливою для розрахунків, безпеки і ефективності перевезень.

В цілому, системи вагового контролю допомагають підприємствам забезпечити точність, надійність та ефективність у процесах зважування, що впливає на якість продукції, витрати матеріалів та виробничу продуктивність.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		18

## **2. Розробка алгоритму дій транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю**

В даному розділі буде наведено опис алгоритму дії транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю. Цей алгоритм визначає послідовність операцій, які виконуються на лінії для ефективного пакування продукції та контролю її ваги. Для опису було вибрано ТПЛСВК для паперового виробництва, тобто об'єктом на конвеєрах будуть рулони целюлози.

Перш за все, на початку робочого циклу лінія встановлює початкові параметри та налаштування системи вагового контролю. Це включає калібрування вагових перетворювачів, налаштування діапазону ваги, обрання необхідних одиниць виміру та інші параметри, пов'язані з ваговим контролем.

Після цього лінія готова до приймання продукції. Продукція подається на конвеєр, який автоматично переміщує її через різні станції обробки та пакування. Під час переміщення продукції, вагові сенсори системи вагового контролю вимірюють вагу продукту.

Після завершення всіх необхідних операцій, включаючи пакування, маркування та інші процеси, готовий продукт виводиться з лінії. Система вагового контролю також може забезпечувати вимірювання та збір даних про вагу продукції для подальшого аналізу та контролю якості.

Цей алгоритм дії транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю дозволяє автоматизувати процес пакування продукції, забезпечуючи точний контроль ваги та виключаючи виробничі помилки, що пов'язані з невідповідністю ваги продукту заданим стандартам.

Кресленики системи, яка проєктується наведено в графічній частині проєкту.

### **2.1. Перевантаження з КП на КВП та рух візка КВП до ПЗ**

1. Операція виконується, якщо:

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		19

- 1) Натиснута кнопка 49SB3 "КП-КВП";
- 2) Візок конвеєра верхнього пересувного (КВП) біля конвеєра приймального (КП) (датчик 37SQ7);
- 3) Не натиснуто аварійний датчик 378Q5 або не скинуто аварію за цим датчиком.

2. Виконання операції: КП включається вперед, а КВП назад на великій швидкості опускається відсікач 34A1 на 30с.

Конвеєри зупиняються якщо:

- 1) спрацював датчик 37SQ4 (зупинка КП та КВП);
- 2) якщо за 30с датчик 37SQ4 не спрацює;
- 3) натиснутий аварійний кінцевик 378Q5.

1.3 Рух візка до пристрою зважування (ПЗ) та повернення до КП.

Після зупинки конвеєрів за датчиком, на 2 с включається дзвінок і лампа 34HL2 і після дзвінка включається привід візка КВП на велику швидкість. По датчику 38SQ1 візок гальмує, по датчику 38SQ2 візок зупиняється. Візок повертається через 2с після опускання штанги (датчик 37SQ6 наявності рулонна на КВП). По датчику 37SQ8 візок гальмує, по датчику 37SQ7, візок зупиняється.

## **2.2. Перевантаження з КВП на ПЗ в автоматичному режимі**

1. Операція виконується, якщо:

- 1) візок знаходиться біля (ПЗ) (датчик 38SQ2);
- 2) на пакувальному верстаті немає пакування рулону;
- 3) на електронно-обчислювальна машині (ЕОМ) або рідкокристалічному індикаторі (РКІ) заданий формат упаковки;
- 4) натиснута кнопку 49SB1 «КВП→ПЗ».

2. Перевантаження здійснюється з урахуванням розгону та гальмування конвеєрів, швидкості конвеєрів з урахуванням відстані від початку конвеєру УВ до датчика, часу від початку руху до перетину датчика 38SQ4.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		20

### 2.3. Перевантаження рулону з ПЗ на ВП

1. Для точної установки по центру верстату пакування (ВП) необхідно, щоб ролон знаходився точно по центру ПЗ.

2. Операція виконується, якщо немає упаковки, у два етапи:

1) після першого натискання кнопки 49SB4 "ПЗ-ВП" включаються конвеєри УВ і СУ - ролон встановлюється приблизно по краю конвеєр ВП;

2) після другого натискання кнопки вмикається конвеєр ВП ролон встановлюється точно по центру ВП

3. Загальний час руху конвеєрів враховує довжину конвеєр ПЗ і ВП та швидкість конвеєрів. На першому етапі конвеєри рухаються  $\frac{3}{8}$  загального часу. На другому етапі  $\frac{5}{8}$  загального часу.

### 2.4. Початок упаковки рулону

1. Операція виконується, якщо:

1) натиснута одна з кнопок упаковки рулону «Обмотка автоматична» 51SB1, «Осьова обмотка.» 51SB2 <<Тангенційна обмотка>> 51SB4;

2) притискний вал зверху (датчик 45SQ5);

3) каретка вгорі (датчик 40SQ6);

4) каретка зліва (датчик 40S08);

5) планшайба у вихідному (датчик 40SQ1);

6) фіксатор піднятий (датчик 45SQ3);

7) несучі вали розведені (датчик 45SQ2).

2. Після перевірки умов за пунктом 1 виконуються такі операції:

1) Піднімаються несучі вали (контроль за датчиком 45SQ1);

2) опускається притискний вал (контроль за датчиком 45SQ5);

3) визначається діаметр рулону за допомогою багатооборотного резистора 60R4 і, відповідно, кількість оборотів планшайби при осьовій обмотці.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		21

3. За обчисленим діаметром, каретка рухається вниз і встановлюється по центру рулону (положення каретки контролюється за допомогою лінійного резистора 60R2).

4. Якщо перемикач 51SA1 в положенні «Ручний» установка каретки по центру рулону, на початку осьової обмотки, не відбуватиметься.

## **2.5. Осьова обмотка рулону**

1. Кількість обертів планшайби та швидкість обертання несучих валів визначається за діаметром рулону та кількістю шарів обмотки, що задається на РКІ.

2. Опускається фіксатор (контроль за датчиком 45SQ4) і планшайба вмикається на високу швидкість (25Гц). Контроль кількості оборотів відбувається за датчиком 40SQ1.

3. На передостанньому обороті планшайба за датчиком переходить на середню швидкість (18Гц), на останньому обороті планшайба по датчику переходить на малу швидкість (5Гц).

4. На останньому обороті включається гальмо планшайби.

5. На останньому обороті, за датчиком 40SQ2 планшайба переходить на найменшу швидкість (2,5 Гц); по датчику 40SQ3 піднімається фіксатор, за датчиком 40SQ1 планшайба зупиняється.

## **2.6. Тангенційна обмотка рулону**

1. Включається електромагніт повороту каретки 23YA5.

2. Каретка рухається праворуч, доки ультразвуковий датчик 40SQ5 не зафіксує лівий край рулону.

3. Після того, як датчик зафіксує 40SQ5 край рулону, включається привід несучих валів, а через 2с каретка починає рух вправо, поки датчик 40SQ4 не зафіксує лівий край рулону. Швидкість руху каретки залежить від діаметра рулону та швидкості несучих валів.

									Арк.
									22
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата	<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>				

4. Після того, як датчик 40SQ4 зафіксує лівий край рулону, каретка реверсує та рухається вліво. Коли датчик 40SQ5 зафіксує правий край рулону, каретка зупиняється.

5. Якщо під час обмотки каретка наїде на аварійний кінцевий в 40SQ9, обмотка зупиняється.

## **2.7. Зупинка упаковки**

1. Упаковка зупиняється:

1) Якщо під час осьової обмотки натиснути кнопку 51SB3 "стоп осьової обмотки";

2) якщо під час тангенціальної обмотки натиснути кнопку 51SB5 "стоп тангенціальної обмотки";

3) після виконання циклу обмотки;

4) після натискання аварійного стопу.

2. Осьова обмотка зупиняється за два обороти планшайби.

3. Тангенційна обмотка зупиняється одразу після натискання кнопки.

4. Під час зупинки:

1) піднімається притискний вал;

2) розлучаються несучі вали;

3) каретка рухається ліворуч до датчика 40SQ8;

4) каретка рухається до датчика 40SQ6.

5. Після натискання аварійного фіксатора обмотка припиняється, але фіксатор не піднімається (якщо йде осьова обмотка).

6. Щоб підняти фіксатор планшайби необхідно:

1) зняти аварійний фіксатор;

2) вручну повернути планшайбу у вихідне положення;

3) натиснути кнопку "стоп осьовий" або "стоп тангенціальної" - фіксатор підніметься.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		23

## 2.8. Керування приводами ВП в ручному режимі

1. У ручному режимі можна керувати такими механізмами:

- 1) приводом 21M1 вертикального переміщення каретки;
- 2) приводом 20A1 горизонтального переміщення каретки.

2. У ручному режимі перерахованими механізмами можна керувати, якщо перемикач 51SA1 у положенні «ручний» і натиснута відповідна кнопка, що дає команду на роботу відповідного механізму .

3. Приводом горизонтального переміщення каретки можна керувати тільки при зупинці.

4. Приводом вертикального переміщення каретки можна керувати при зупиненому циклі обмотки та під час осьової обмотки. Оператор має можливість коригувати лише положення каретки під час осьової обмотки.

5. Якщо перемикач 51SA1 в положенні "Ручний" - встановлення каретки по центру рулону, на початку осьової обмотки, відбуватися не буде

## 2.9. Перевантаження рулону з конвеєра ВП на буферний конвеєр

1. Операція виконується якщо:

- 1) не йде цикл упаковки рулону;
- 2) на буферному конвеєрі відсутній рулон;
- 3) натиснута кнопка 49SB2 «ВП→БК».

2. Виконання операції:

2.1 Конвеєри ВП і буферний конвеєр (БК) включаються вперед. Під час перетину рулоном датчика 38SQ5, автоматизована система управління (АСУ) фіксує довжину рулону. При визначенні довжини рулону враховується швидкість руху конвеєрів та час спрацьовування датчика 38SQ5.

2.2 Якщо ліфт зверху відсутній (кінцевик 41SQ1), конвеєри зупиняються і АСУ запам'ятовує положення рулону на БК.

2.2 Скидання прапорцю «рулон на БК» відбувається після перевантаження рулону в ліфт або після натискання аварійного стопа.

									Арк.
									24
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата	<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>				



2.3 Якщо ліфт вгорі (кінцевик 41SQ1) і рулон звільнив датчик, то:

1) якщо ліфт вільний (АСУ «вважає» ліфт вільним, коли він приїхав вгору), то конвеєр ВП зупиняється, а КБ продовжує завантаження в ліфт;

2) якщо ліфт частково заповнений, то АСУ визначає, чи поміститься перевантажуваний рулон в ліфті:

- якщо поміститься, то конвеєр ВП зупиняється, а БК продовжує завантаження ліфту;

- якщо не поміститься, конвеєри зупиняються, і АСУ запам'ятовує положення рулону на КБ. Надається команда на опускання ліфта.

3. Якщо через 30с датчик не фіксує початок рулону, то конвеєри ВП та БК зупиняються.

4. Після закінчення упаковки блимає лампа 63HL4.

## **2.10. Перевантаження рулону з БК у ліфт**

1. Операція виконується, якщо:

1) ліфт вгорі (на кінцевіку 41SQ1);

2) ліфт вільний чи частково заповнений (фіксується в АСУ другого поверху);

3) не натиснутий аварійний датчик 43SQ2 або не скинуто аварію за цим датчиком.

2. Виконання операції:

2.1. БК увімкнено вперед і рулон рухається до ліфта.

2.2. Після спрацювання кінцевика 39SQ1 через 2с вмикається вперед конвеєр ліфта.

2.3. Під час завантаження рулону в ліфт спрацьовує датчик 38SQ6.

2.4. БК та пристрій для спуску (ПДС) зупиняються:

1) Після звільнення датчика 38SQ6;

2) якщо за 30с датчик не спрацьовує 39SQ1;

3) натиснутий аварійний кінцевик 43SQ2.

									Арк.
									25
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата	<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>				

3. Після зупинки конвеєрів АСУ визначає кількість вільного місця в ліфті. Якщо вільного місця менше, чим довжина рулонна, який тільки загрузився, то дається команда на опускання ліфту вниз.

### **2.11. Управління конвеєрами другого поверху у ручному режимі**

1. Для керування конвеєрами в ручному режимі потрібно, щоб відповідний перемикач був в положенні «Ручний» і була натиснута відповідна кнопка, що дає команду на рух механізму

2. У ручному режимі можна керувати такими механізмами

1) конвеєром КП; перемикач «Ручий-автомат» відсутній, кнопки розташовані на посту 1;

2) візком КВП; в ручному режимі зберігається реакція на датчики гальмування та зупинки;

3) конвеєром КВП:

4) конвеєром ПЗ.

5) конвеєром ВП;

6) конвеєром БК; кнопки розташовані на посту 3;

7) конвеєром ПДС; кнопки розташовані на посту 3.

### **2.12. Рух ліфта в автоматичному та ручному режимах**

1. Команду руху ліфта вниз отримує АСУ першого поверху від АСУ другого поверху, після заповнення ліфта рулонами.

2. Після початку руху ліфта вниз (і в ручному і автоматичному режимі) АСУ вважає, що ліфт вільний.

3. Для керування ліфтом у ручному режимі необхідно перевести перемикач 53SA1

у положення «Ручний» і натиснути відповідну кнопку, яка дає команду на рух ліфта вгору або вниз.

4. У ручному режимі зберігається реакція на датчики гальмування та зупинки.

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата	<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>				

5. Команда на рух ліфта вгору дається, якщо:

- 1) перемикач у положенні 53SA1 «Автомат»;
- 2) оптоелектронні датчики 44SQ1 і 44SQ2 не перекриті;
- 3) кінцевик 41SQ5 спрацював на час проїзду рулону і повернувся у вихідне положення.

### **2.13. Вивантаження рулону з ліфта та рух візка КНП до КПП1**

1. Вивантаження з ліфта виконується, якщо:

- 1) Перемикач у положенні 54SA1 «Авт.»;
- 2) Ліфт унизу, на кінціику 41SQ4;
- 3) Візок КНП біля конвеєра нижнього приймального (КПП) (датчик 42SQ1);
- 4) Не спрацьований кінцевик 41SQ5, між конвеєром УДС та КПП;
- 5) У попередньому циклі не зафіксовано аварію з перевищення часу вивантаження з ліфта (10с).

2. Вивантаження з ліфта:

2.1. Конвеєр ПДС вмикається назад, а КПП уперед. Після вивантаження АСУ дає команду на підйом ліфта. Кінець вивантаження визначається за такими умовами:

- 1) Оптоелектронні датчики 44SQ1 та 44SQ2 не перекриті;
- 2) Кінцевик 41SQ5 спрацював на час проїзду рулону та повернувся у вихідне положення;

3) Час вивантаження не перевищує 10 с.

2.2. Якщо час вивантаження перевищує 10 с. то:

- 1) зупиняються конвеєри ПДС та КПП;
- 2) фіксується аварія з перевищення часу вивантаження з ліфта;

3. Після вивантаження рулону з ліфта конвеєр УДС зупиняється, КПП продовжує працювати, включається конвеєр КНП на велику швидкість.

Конвеєри КПП та КНП зупиняються, якщо:

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		27

- 1) Спрацював датчик 41SQ6 зупинки КПП і КНП через час менше 3 с (у цьому випадку фіксується аварія);
- 2) Спрацював датчик 41SQ6 зупинки КПП і КНП через час більше 3 с;
- 3) Спрацював аварійний датчик 41SQ7.

#### **2.14 Рух візка КНП в автоматичному режимі**

1. Візок рухається до КПП1, якщо:

- 1) спрацював датчик 41SQ6 зупинки КПП та КНП;
- 2) не натиснуто аварійний датчик 41SQ7 або не зафіксовано аварію за

цим датчиком.

2. По датчику 42SQ3 візок гальмує, по датчику 42SQ4 візок зупиняється. У разі несправності датчика 41SQ8 (наявність рулону на КНП) візок відразу повертається до КПП.

3. У ручному режимі зберігається реакція на кінцевики гальмування та зупинки.

4. Візок повертається до КПП після вивантаження рулону на КПП1.

5. Перед початком руху візка вмикається дзвінок на 2 секунди.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		28

### **3. Проектування ваговимірювального тензорезистонного перетворювача**

#### **3.1. Вибір датчика та обґрунтування вибору конструкції пружного елемента**

Тензометричні ваговимірювальні датчики, також відомі як тензометричні датчики, є головними структурними елементами перетворення фізичної величини "маса" на стандартизований електричний сигнал. Сигнал, отриманий з тензодатчика, подальшим чином обробляється вторинними перетворювачами, основні з яких аналого-цифровий перетворювач, ваговий процесор та ваговий індикатор.

Тензометричні датчики ваги - пристрої, які використовують для вимірювання маси об'єктів або сил з якими ці об'єкти притягуються до Землі базуються на визначенні деформацій розтягування-стискання або зсуву пружного елемента. Існує багато методів вимірювання деформації залежно від принципу перетворення, таких як тензорезистивні, оптико-поляризаційні, п'єзорезистивні, волоконно-оптичні або просто зчитування показань з лінійного механічного датчика. Серед електронних тензодатчиків найбільш поширеними є тензорезистивний принцип перетворення деформацій [5].

На ринку існує багато виробників та моделей тензорезисторних датчиків, і вибір найкращого залежить від конкретних потреб і вимог проєкту. Провідними виробниками високоякісних тензорезисторних датчиків вважаються:

1) НВМ (Hottinger Baldwin Messtechnik): НВМ є одним з провідних виробників тензорезисторних датчиків, відомих своєю високою якістю та надійністю [4].

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		29



Рис. 3.1 – Тензорезисторний датчик типу RTN виробництва HBM

Тензодатчики RTN в кільцевому торсійному виконанні від HBM є прецизійними і надійними пристроями, які застосовуються для вимірювання широкого діапазону навантажень. Уніфікований ряд має найвищі границі зважування Max від 1 тонни до 470 тонн. Їх компактність і висока міцність до перевантажень роблять їх ідеальними для використання у великих платформових вагах, зважування контейнерів та конструкції автомобільних ваг, навіть в умовах несприятливого навколишнього середовища.

Тензодатчики RTN мають високу точність і зменшують вплив бокового навантаження завдяки своїм унікальним кільцевим пружним елементам. Вони також володіють високим входним опором і низьким споживанням енергії, що дозволяє використовувати вимірювальні блоки з живленням від акумуляторів.

Крім того, доступні різноманітні спеціальні версії тензодатчиків RTN, такі як IECEx-ATEX або термостійкі версії з робочою температурою до 110 °C. Кабелі тензодатчиків можуть бути поставлені в різних довжинах і з різними типами кабелів.

Такі характеристики і можливості тензодатчиків RTN роблять їх високо ефективними і надійними рішеннями для вагових систем в різних промислових галузях.

2) Vishay Precision Group: Vishay Precision Group також відомий своїми тензорезисторними датчиками високої точності, які використовуються в різних галузях. Проте з проглянутих датчиків не знайшлося жодного, який відповідав завданню на проектування автоматичної лінії.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		30

3) Flintec: Flintec є спеціалістом у виробництві тензорезисторних датчиків для вагового контролю та вимірювання сили. Беремо один з доволі часто використовуваних на підприємствах датчик на зсув серії SB4 [9].



Рисунок 3.2 – Тензорезисторний датчик типу SB4

Тензорезисторний датчик типу "консольна балка на зсув" є одним з найпоширеніших конструктивних варіантів, які використовуються у промисловому ваговимірюванні. Його принцип дії базується на перетворенні зсувної деформації вздовж площі вертикальної симетрії пружного елемента на електричний сигнал. В датчику використовуються тензорезистори, елементи нормування та термокомпенсації, які з'єднані за мостовою схемою Уітстона.

Ці датчики застосовуються як компоненти ваговимірювальних (силовимірювальних) та вагодозуючих системах, а також у вагах III (середнього) класу точності. Вони забезпечують надійне вимірювання ваги і використовуються у різноманітних галузях промисловості, де потрібна точна і надійна вагова інформація.

4) Sensortronics: Sensortronics спеціалізується на розробці та виробництві тензорезисторних датчиків ваги високої якості для промислових застосувань [7].



Рис. 3.3 – Тензорезисторний датчик типу 60001С

Тензорезисторні вагові датчики серії 6А призначені для перетворення статичних та квазістатичних навантажень у вагових пристроях на електричний сигнал. Вони широко використовуються в промисловості, сільському господарстві та транспорті.

Принцип роботи цих датчиків полягає в тому, що вони перетворюють деформацію тензорезисторів, пов'язану з навантаженням на їх пружний елемент, в електричний сигнал. Датчики складаються з мостової схеми, в якій тензорезистори з'єднані, і включають систему термокомпенсації.

У залежності від конструкції та номінального навантаження, датчики доступні в різних модифікаціях: 60001С, 60050С, 60063, 65088С та 65114.

5) Zemic: Zemic також відомий своїми тензорезисторними датчиками ваги, які застосовуються у багатьох галузях, включаючи автомобільну та медичну[8].





Рис. 3.4 – Тензометричний датчик типу VM8D

Тензометричний датчик VM8D є балковим датчиком на зсув, який широко застосовується для створення платформних ваг та ваговимірювальних систем. Він є одним з популярних конструктивних виконань, які використовуються в промисловому ваговимірюванні. Завдяки своєму низькому профілю і високим метрологічним характеристикам, цей тип датчиків знайшов широке застосування в багатьох промислових системах ваговимірювання.

Тензодатчик VM8D володіє високою стійкістю до важких промислових умов, включаючи лужні і кислотні середовища. Корпус датчика виготовлений з нержавіючої сталі з використанням лазерного зварювання, що забезпечує високу захисну пиловологозахисну властивість (клас захисту IP68). Тому даний датчик рекомендований для застосування на м'ясокомбінатах і молокозаводах, де вимагається висока надійність та стійкість до агресивних середовищ.

Застосування тензометричного датчика VM8D у вагових системах дозволяє отримати точні та надійні вимірювання маси в різних промислових процесах, покращує ефективність та контроль якості. Його надійність, висока метрологічна точність та стійкість до агресивних середовищ роблять його популярним вибором для багатьох вагових застосувань у промислових галузях.

З вище переглянутих датчиків за аналог для проєктування обраний датчика типу RTN фірми HBM, так як його кількість верифікованих поділок

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		33

до  $n=20000$  забезпечують похибки вимірювання менше  $M_{ax}/20000$  (0,0005%), стійкість до перевантажень до 170% від  $M_{ax}$ , чутливість  $R_{KP}=2,85$  мВ/В.

Незважаючи на те що в Україні освоєні технології виробництва фольгових тензорезисторів, перетворювачів нормуючих фольгових, прецизійних сплавів та клейових сполучень, спроб створення тензодатчиків з подібними пружними елементами не виявлені. Тому далі розробимо модель датчика і його пружний елемент.

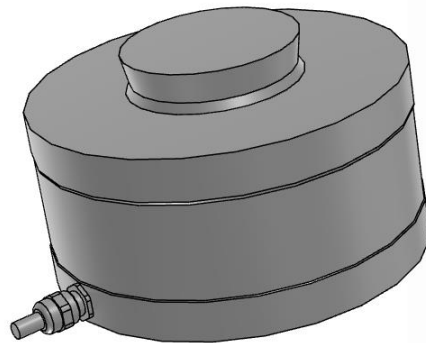


Рисунок 3.5 – Розроблений тензометричний датчик типу RTN

Пружний елемент є ключовим компонентом тензодатчика і відповідає за перетворення зовнішньої сили на деформацію. Вхідною величиною для пружного елемента є сила, а вихідною - деформація або переміщення. Деформацію можна описати як зміщення точок на поверхні пружного елемента, тоді як переміщення - прогин характерних точок пружного елемента у напрямку дії сили або в іншому напрямку, пов'язаному з напрямком дії сили.

Якщо вихідною величиною пружного елемента є деформація, то для її вимірювання часто використовують тензорезисторні перетворювачі. У випадку переміщення можуть використовуватися індуктивні або ємнісні перетворювачі. Основними характеристиками пружного елемента є [6]:

- Метрологічні характеристики: вони включають нелінійність, гістерезис, вплив поперечних сил, згинаючих і крутячих моментів, та температурні коефіцієнти.

- Жорсткість пружного елемента: це один з основних параметрів, який впливає на похибку вимірювання при динамічних навантаженнях або при наявності динамічних перешкод.
- Габаритні розміри та форма пружного елемента: вони визначають можливості його вбудови в конструкцію системи.
- Технологічність конструкції пружного елемента, включаючи металообробку, нанесення тензорезисторів та їх монтаж.
- Діапазон номінальних навантажень, для якого конструкція пружного елемента призначена.

Наразі виробники вагового обладнання пропонують різноманітні форми і конструкції пружних елементів. Це пояснюється тим, що важко задовольнити всі вимоги, які були перераховані вище, у одній конкретній конструкції. Головними критеріями є метрологічні параметри та надійність, тому проводяться роботи щодо вдосконалення тензодатчиків сили з урахуванням цих аспектів.

Важливо враховувати, що пружний елемент повинен бути достатньо чутливим, щоб реагувати на зовнішні навантаження, а також стійким, щоб забезпечувати надійну та стабільну роботу датчика протягом тривалого періоду часу.

Конструкція пружного елемента альтернативного датчика для аналізу співвідношень складових механічних напруг показана на рис. 3.6 і являє собою систему радіального розміщення двічі заземлених балок.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		35

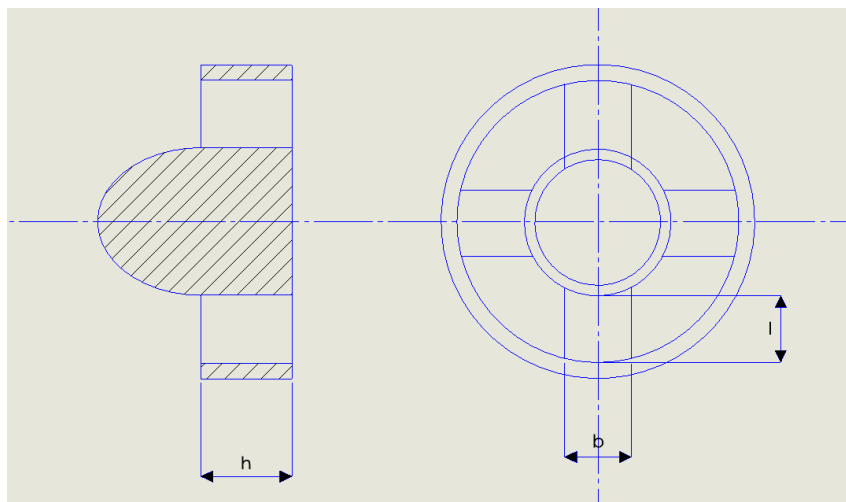


Рисунок 3.6 – Конструкція пружного елемента

Параметри  $b$ ,  $l$ ,  $h$  пружного елемента обмежені конструкцією корпуса, а також розмірами силовідного елемента:  $b=10..25$  мм,  $l=20$  мм,  $h=10..38$  мм.

Для даної конструкції зсувні і згинні напруги розраховуються за наступними формулами відповідно [12]:

$$\tau_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{bh}, \sigma_u = \frac{3Pl}{bh^2}, \quad (3.1.1)$$

де  $P$  – сила, прикладена до одної з балок.

Тоді співвідношення максимальної дотичної напруги  $\tau_c$ , що з'являється на середині висоти бокової поверхні балки, і максимальної напруги  $\sigma_u$  від згину, що виникає на верхній і нижній поверхнях балки, виражається залежністю [12]:

$$\frac{\tau_c}{\sigma_u} = \frac{h}{2l}. \quad (3.1.2)$$

На рис. 3.7 зображений графік залежності напруг від геометричних параметрів пружного елемента. На ньому виділені 3 зони: зона зсуву, за відповідальних їй геометричних параметрів краще використовувати зсувні напруги; зона згину, де бажано використовувати згинні напруги; співвідношення розмірів, що відповідають зоні невизначеності краще використовувати в конструкціях ПЕ.

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

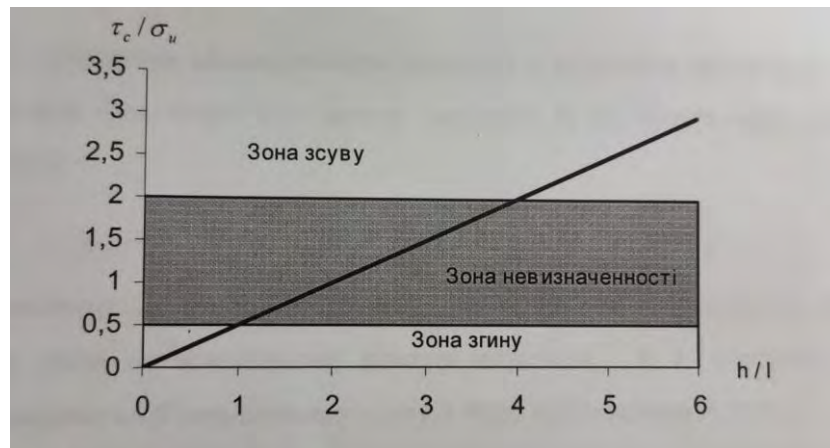


Рисунок 3.7 – Графік залежності механічних напруг від h/l

Підставивши числові дані отримаємо такі результати для даної конструкції:  $\frac{\tau_c}{\sigma_u} = 0,25..0,95$ . Отже при даних геометричних розмірах ПЕ співвідношення  $\frac{\tau_c}{\sigma_u}$  знаходиться в зонах невизначеності та згину. Звідси робимо висновок, що навіть при найбільшому значенні висоти пружного елемента, що є не найкращим варіантом конструкції, адже виникає проблема захисту від паразитних складових вимірюваної сили, напруга від згину перевищує зсувну напругу.

Доцільність використання згинної напруги у проєктованому датчику не викликає сумніву, але відкритим залишається питання його конструкції. Для того щоб як найвигідніше використовувати обмеження за формою ПЕ, а саме циліндричної, проаналізуємо відносні деформації, що виникають на поверхні круглої пластини за різних умов її фіксації та конструкції центру під дією зосередженої сили.

Рівняння прогину круглої пластини, що навантажена зосередженою силою, має вигляд [13]:

$$\omega = \frac{Pr^2}{8\pi D} \left( \ln \frac{r}{a} - 1 \right) - \frac{C_1 r^2}{4} - C_2 \ln \frac{r}{a} + C_3, \quad (3.1.3)$$

тоді кут нахилу дотичної до лінії згину [7]:

$$\varphi = \frac{d\omega}{dr} = \frac{Pr}{8\pi D} \left( 2 \ln \frac{r}{a} - 1 \right) - \frac{C_1 r}{2} - \frac{C_2}{r}, \quad (3.1.4)$$

де a – радіус пластини, r – відстань до центру пластини.

Сталі інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  визначаються із граничних умов окремих для кожного випадку.

Випадок 1.

На рис.3.8 зображено вільно обперту пластину з жорстким центром, так як кут нахилу дотичної біля жорсткого центру дорівнює 0, то будуть вірні наступні співвідношення [6]:

$$\varphi(b) = 0 \Rightarrow \varphi = \frac{Pb}{8\pi D} \left( 2\ln \frac{b}{a} - 1 \right) - \frac{C_1 b}{2} - \frac{C_2}{b}, \quad (3.1.5)$$

Для знаходження 2-х сталих інтегрування необхідне ще одне рівняння, його ми отримаємо з розумів на зовнішньому контурі пластини: так як пластина вільно обперта, то момент на її зовнішньому контурі буде дорівнювати 0, тобто [12]:

$$M(a) = 0 \Rightarrow -D \left( \frac{d^2 \omega}{dr^2} - \frac{\nu}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) \Bigg|_{r=a} = 0, \quad (3.1.6)$$

де  $D \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  – циліндрична жорсткість пластини,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E$  – модуль пружності,  $h$  – товщина пластини.

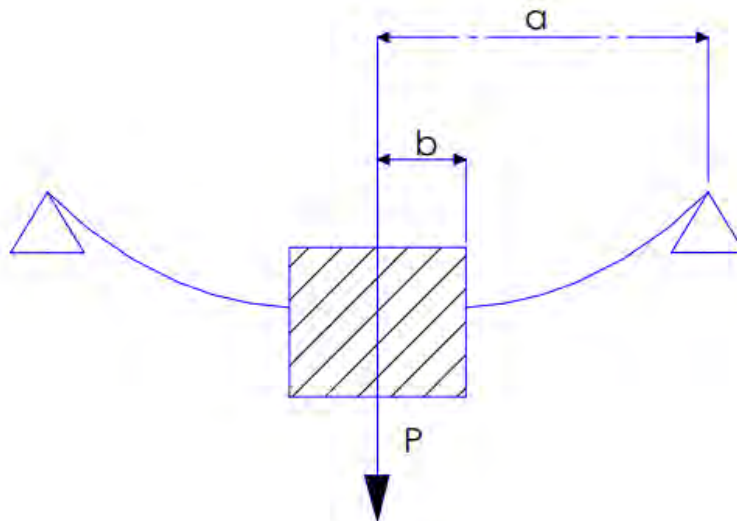


Рисунок 3.8 – Вільно обперта пластина

Виходячи з того що  $\frac{d\varphi}{dr} = \frac{d^2 \omega}{dr^2} = \frac{P}{8\pi D} \left( 2\ln \frac{r}{a} + 1 \right) - \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{b}$ , знайдемо сталі інтегрування з системою рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 \frac{b}{2} + C_2 \frac{1}{b} = \frac{Pb}{8\pi D} (2\ln \frac{b}{a} - 1) \\ C_1 \frac{1+v}{2} + C_2 \frac{v-1}{a^2} = \frac{P}{8\pi D} (1-v) \end{cases}, \quad (3.1.7)$$

Для цього скористаємося методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{b}{2} & \frac{1}{b} \\ \frac{1+v}{2} & \frac{v-1}{a^2} \end{vmatrix} = \frac{b^2(v-1) - a^2(1+v)}{2a^2b},$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{Pb}{8\pi D} (2\ln \frac{b}{a}) & \frac{1}{b} \\ \frac{P}{8\pi D} (1-v) & \frac{v-1}{a^2} \end{vmatrix} = \frac{P(v-1)(2b^2 \ln \frac{a}{b} - b^2 + a^2)}{8\pi D a^2 b},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \frac{b}{2} & \frac{Pb}{8\pi D} (2\ln \frac{b}{a}) \\ \frac{1+v}{2} & \frac{P}{8\pi D} (1-v) \end{vmatrix} = \frac{Pb(2-v-2\ln \frac{a}{b})}{16\pi D},$$

Звідки

$$C_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{P(v-1)(2b^2 \ln \frac{a}{b} - b^2 + a^2)}{4\pi D (b^2(v-1) - a^2(1+v))},$$

$$C_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{Pa^2 b^2 (2-v-2\ln \frac{b}{a})}{8\pi D (b^2(v-1) - a^2(1+v))}.$$

Випадок 2.

Для вільно обпертої кільцевої пластини рис.3.9 прогин зовнішнього краю пластини дорівнює 0 і моменти на зовнішньому та внутрішньому краях також нульові, тобто [12]:

$$\omega(a) = 0, -D \left( \frac{d^2 \omega}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) \Big|_{r=a} = 0, -D \left( \frac{d^2 \omega}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{d\omega}{dr} \right) \Big|_{r=b} = 0. \quad (3.1.8)$$

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

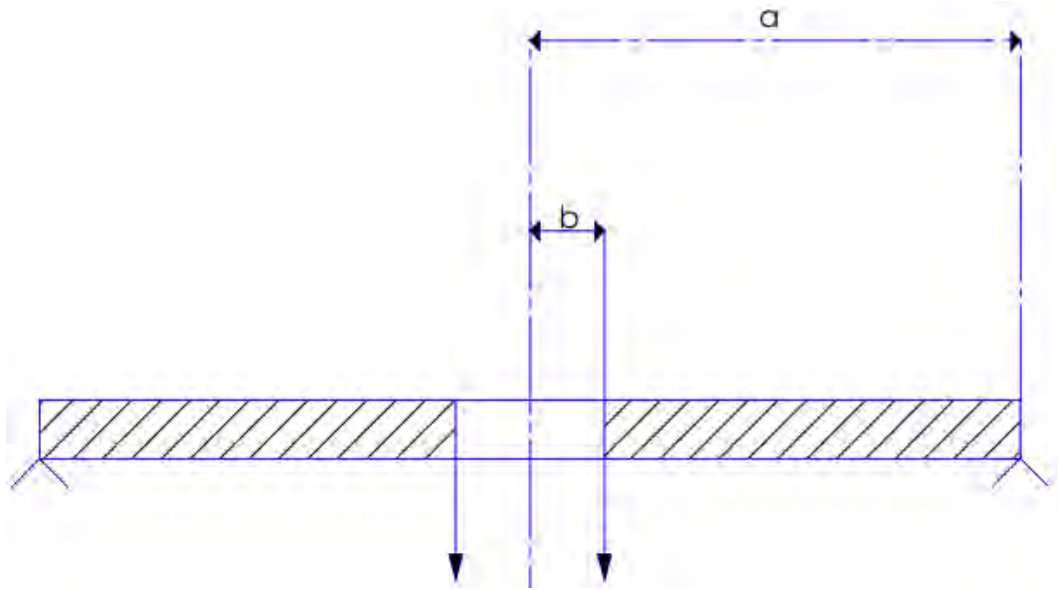


Рисунок 3.9 – Вільно обперта кільцева пластина

Аналогічно попередньому випадку заходимо сталі інтегрування:

$$C_1 = \frac{P}{4\pi D} \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} - \frac{2b^2}{a^2-b^2} \ln \frac{b}{a} \right), C_2 = -\frac{(1+\nu)P}{(1-\nu)4\pi D} \frac{a^2 b}{a^2-b^2} \ln \frac{b}{a}.$$

Випадок 3.

Для пластини з жорстким центром, що жорстко закріплена по контуру (рис.3.10), кут нахилу дотичної на контурі і біля жорсткого центру дорівнює 0, тобто  $\varphi(a) = 0, \varphi(b) = 0$ , звідки сталі інтегрування:

$$C_1 = -\frac{Pa^2 + Pb^2(2\ln \frac{b}{a} - 1)}{4\pi D(a^2 - b^2)}, C_2 = \frac{Pa^2 b^2 \ln \frac{a}{b}}{4\pi D(a^2 - b^2)}.$$

Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата



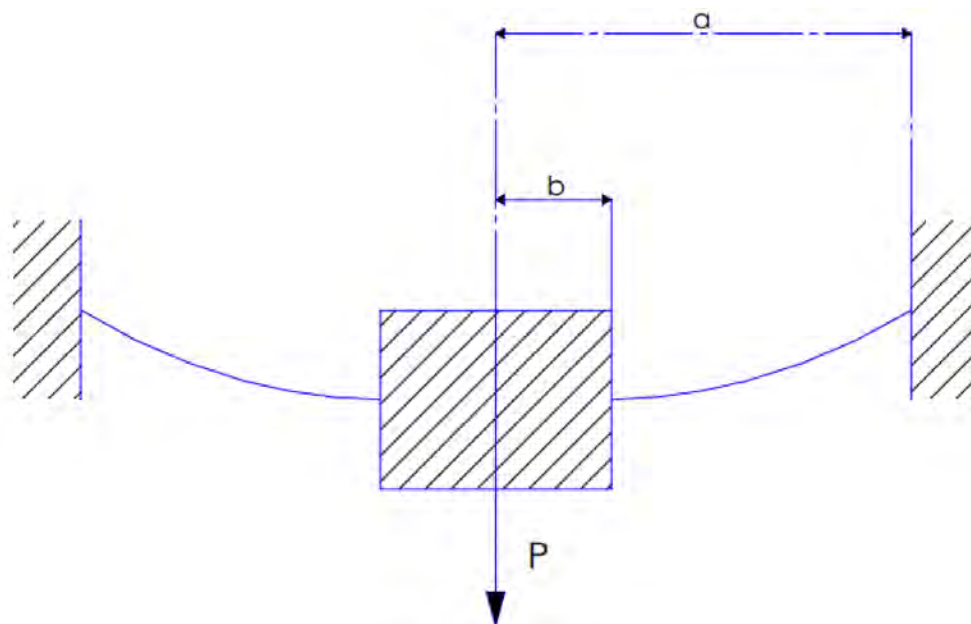


Рисунок 3.10 – Пластина з жорстким центром, що жорстко закріплена по контуру

При згині даних конструкційних пластин, а саме симетрично навантажених, товщиною  $h$  їх поверхневі волокна деформуються в радіальному і тангенціальному напрямках. Відносна деформація поверхневих волокон в радіальному напрямку визначається залежністю [12]:

$$\varepsilon_r = \frac{h}{2} \frac{d\varphi}{dr}, \quad (3.1.9)$$

а в тангенціальному:

$$\varepsilon_t = \frac{h}{2} \frac{\varphi}{r}. \quad (3.1.10)$$

де  $r$  – відстань від центра пластини,  $\varphi$  – кут нахилу дотичної до поверхні пластини.

Проаналізуємо ці деформації для всіх описаних вище пластин, щоб визначити характер їх розподілу. На рис.3.11 Зображений графік, який ілюструє розподілу відносних деформацій волокон, що знаходяться на різних відстанях до центру пластини.

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

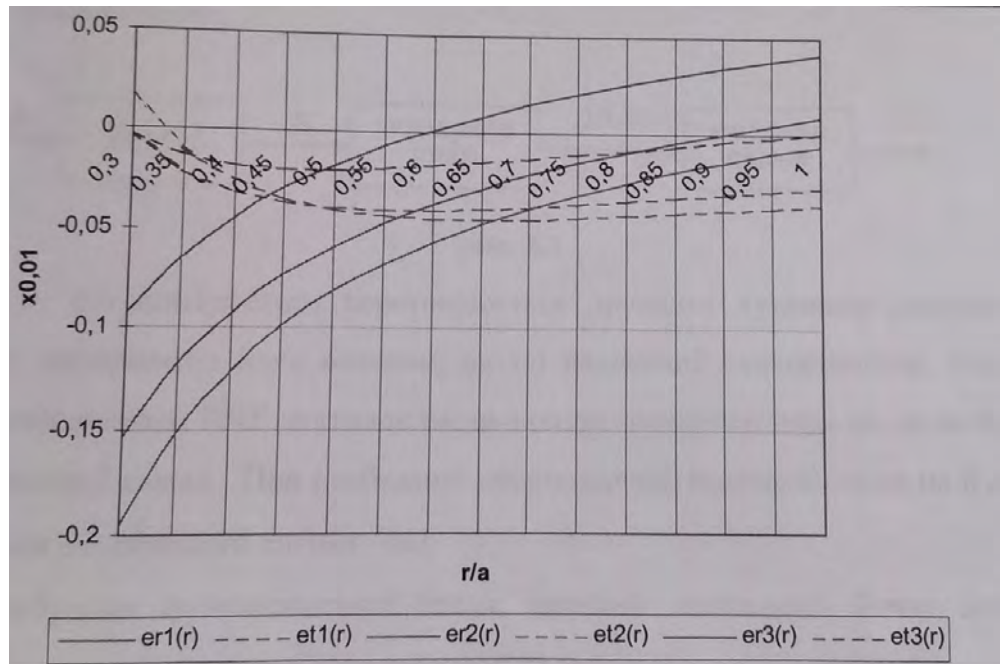


Рисунок 3.11 – Графік розподілу відносних деформацій волокон

Суцільною лінією позначені радіальні деформації, штриховою - тангенціальні. Добре видно, що хоча радіальні деформації на окремих ділянках перевищують тангенціальні більше ніж у два рази, вони сильно залежать від відстані до центру пластини. Тангенціальні ж мають більш рівномірний характер і досягають свого максимуму на  $2/3$  радіусу пластини.

Тензорезистор, що вимірює розмір цих деформацій, має скінчену довжину - базу, і при наклеїці його на поверхню пружного елемента він буде вимірювати деформації волокон, що знаходяться на різній відстані до центру пластини, отже мають різну деформацію, тому показання тензорезистора усереднюються і мають деяку розрахункову невизначенність. При наклеїці тензорезисторів у тангенціальному напрямку, їх база буде розміщуватися вздовж волокон, що мають однакову деформацію і неточність в їх розміщенні буде малою, адже тангенціальні деформації слабо залежать від відстані до центру. Виходячи з цього можна зробити висновок, що для більш точного виміру сили доцільніше використовувати тангенціальні деформації.

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

### 3.2. Розробка структурної та функціональної схем

Принцип роботи тензористорного датчика сили пояснюється наступною структурною схемою:



Рисунок 3.12 – Структурна схема

Сила  $P$ , що вимірюється перетворюється пружним чутливим елементом у відносну деформацію його волокон, на які наклеєний тензорезистор. Відносна деформація волокон ПЧЕ викликає зміни в опорі тензорезистора, що включений у плече мостової схеми. При розбалансі опорів плечей мостової схеми на її виході з'являється електричний сигнал  $\Delta U$ .

Для побудови функціональної схеми датчика розглянемо більш детально зв'язки між величинами, що перетворюються у ньому.

Обрана конструкція пружного елемента зображена на рис. 3.9 і представляє собою вільно обперту кільцеву пластину.

Сила  $p$  зв'язана наступним співвідношенням з кутом нахилу дотичної до лінії згину радіального перетину нейтральної площини пластини [12]:

$$\varphi = \frac{Pr}{8\pi D} \left( 2 \ln \frac{r}{a} - 1 \right) - \frac{C_1 r}{2} - \frac{C_2}{r}, \quad (3.2.1)$$

Де  $C_1, C_2$  - сталі інтегрування, що визначені в п.2, а  $r$  в даному випадку радіус окружності, на якій наклеєні тензорезистори. Тобто залежність має лінійний характер:  $\varphi = K_{\text{ПЧЕ}} \cdot P$ .

Наступним кроком буде визначення залежності відносної деформації  $\varepsilon$  від  $\varphi$ . Так як тензорезистори, що наклеєні на поверхню ПЧЕ, вимірюють тангенціальні відносні деформації, то нас будуть цікавити саме вони [6]:

$$\varepsilon_t = \frac{h \varphi}{2 r}. \quad (3.2.2)$$

Маємо лінійну залежність:  $\varepsilon_t = K_\partial \cdot \varphi$ .

Приріст опору тензорезистора зв'язаний з  $\varepsilon$  через коефіцієнт тензочутливості наступним чином [10]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_t * \varepsilon. \quad (3.2.3)$$

Розглянемо мостову схему:

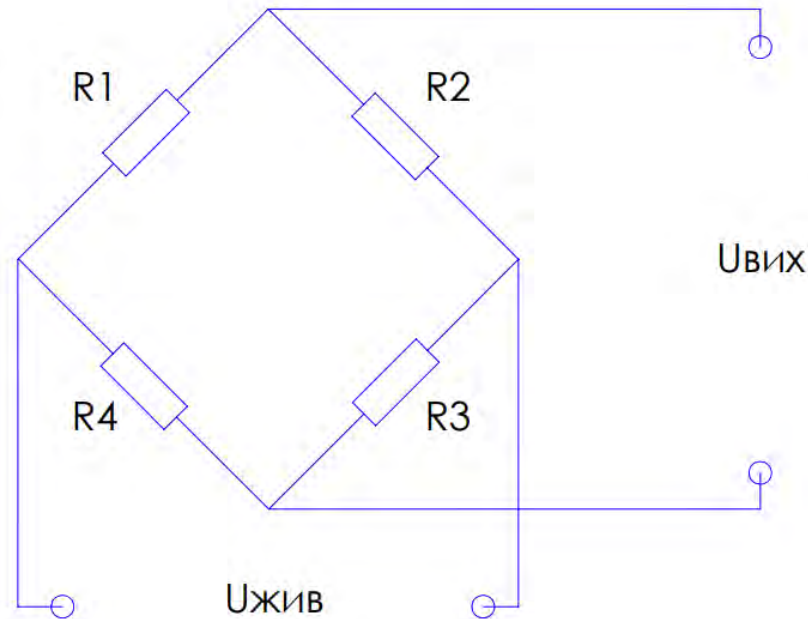


Рисунок 3.13 – Мостова схема

Міст підключений до джерела живлення з напругою  $U_{жив}$ , в його плечі ввімкнені тензорезистори R1, R2, R3, R4. При відсутності вимірюваної величини мостовий ланцюг знаходиться в рівновазі, тобто  $R1/R2=R4/R3=K$ . При зміні опору тензорезисторів на виході схеми з'явиться напруга [10]:

$$\begin{aligned} U_{вих} &= U_{жив} \frac{k}{(k+1)^2} \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \\ &= U_{жив} \frac{k}{(k+1)^2} k_r [\varepsilon_1 + \varepsilon_3 + \varepsilon_2 + \varepsilon_4]. \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Номінальний опір усіх чотирьох резисторів однаковий -  $K=1$ , але R1 і R4 розміщені на верхній поверхні ПЧЕ, а R2 і R3 - на нижній, тому при згині

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

пружного елемента вони будуть отримувати однаковий по модулю, але різний за знаком приріст:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} \frac{k_t}{(1 + 1)^2} \cdot 4\varepsilon = U_{\text{жив}} k_T \varepsilon,$$

Тоді структурна схема для аналізу статичних характеристик буде мати вигляд:

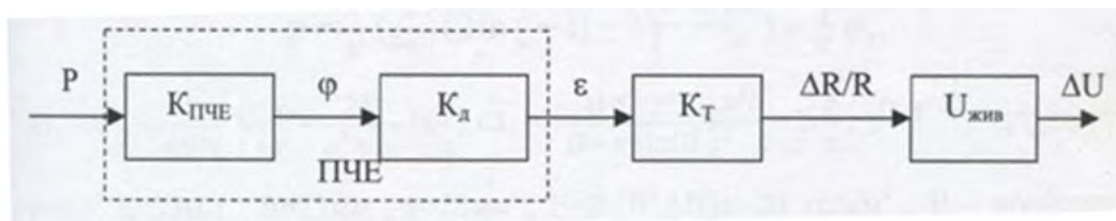


Рисунок 3.14 – Схема структурна для аналізу статичних характеристик

### 3.3. Розрахунок геометричних параметрів ПЕ

На рис. 3.15 зображена конструкція пружного елемента розробляемого датчика, яка складається з силовідного елемента 1, робочої частини 2 і корпусу 3, що виконані як одне ціле

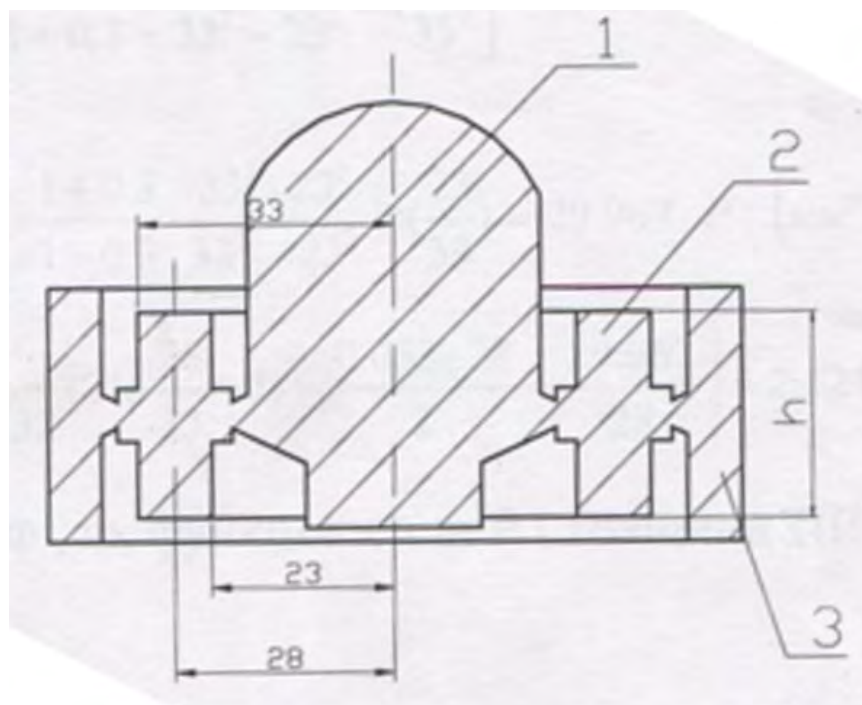


Рисунок 3.15 – Конструкція пружного елемента

Геометричні розміри корпусу і силовідного елемента визначаються розмірами корпусу усього тензодатчика і умовами його застосування.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		45

Геометричні ж розміри кільцеподібної робочої частини частково визначаються розмірами корпусу (його радіуси) і є сталими, частково являють собою функцією номінального навантаження (висота  $h$ ).

Розрахуємо висоту робочої частини. Як зазначалося в технічному завданні РКП, який повинен забезпечити датчик становить  $1,5 \text{ мВ/В} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ , тобто:

$$\frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}} = K_T \cdot \varepsilon_t = 1,5 \cdot 10^{-3}, \text{ де } \varepsilon_t = \frac{h \varphi}{2 r}, K_T = 2,1.$$

В формулу для розрахунку  $\varphi$  множником всіх доданків входить  $D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$ , виділимо  $h^3$  з цього виразу:

$$\varphi = \frac{1}{h^3} \left( \frac{Pr^2}{8\pi D l} \left( 2 \ln \frac{r}{a} - 1 \right) - \frac{Cl_1 r}{2} - \frac{Cl_2}{r} \right) = \frac{1}{h^3} \varphi_1, \quad (3.3.1)$$

Де  $Cl_1 = \frac{P}{4\pi D l} \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} - \frac{2b^2}{a^2-b^2} \ln \frac{b}{a} \right)$ ,  $Cl_2 = -\frac{(1+\nu)P}{(1-\nu)4\pi D l} \frac{a^2 b^2}{a^2-b^2} \ln \frac{b}{a}$ ,  $D l = \frac{E}{12(1-\nu^2)}$ ,

$\nu=0,3$ ;  $a=33 \text{ мм}$ ;  $b=23 \text{ мм}$ ;  $r=28 \text{ мм}$ ;  $E=2 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 20 \text{ тс/мм}^2$ ;  $P$  – номінальне навантаження ПЕ.

Розрахуємо коефіцієнти  $Dl$ ,  $Cl$  та  $Cl_1$ , як функцію від навантаження  $P$ :

$$Dl = \frac{20}{12(1-0,3^2)} = 1,832 \left[ \frac{\text{тс}}{\text{мм}^2} \right]$$

$$Cl_1 = P \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,832} \left[ \frac{1-0,3}{1+0,3} - \frac{2 \cdot 23^2}{33^2 - 23^2} \ln \left( \frac{23}{33} \right) \right] = 0,053 \cdot P \text{ [мм}^2\text{]}$$

$$Cl_2 = -P \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,832} \cdot \frac{1+0,3}{1-0,3} - \frac{33^2 \cdot 23^2}{33^2 - 23^2} \ln \left( \frac{23}{33} \right) = 29,967 \cdot P \text{ [мм}^4\text{]}$$

Тоді  $\varphi_1 = P \left[ \frac{28^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 1,832} \left( 2 \ln \frac{28}{33} - 1 \right) - \frac{0,053 \cdot 28}{2} - \frac{29,967}{28} \right] = 2,621 \cdot P \text{ [мм}^3\text{]}$  і кут нахилу дотичної  $\varphi$ , як функція сили  $P$  і товщини ПЕ  $h$  буде визначатися виразом:  $\varphi = 2,621 \cdot \frac{P}{h^3}$ .

Звідси отримаємо вираз для визначення відносної тангенціальної деформації:

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата	<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>				

$$\varepsilon_e = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{28} \cdot \frac{P}{h^3} \cdot 2,621 = 0,0486 \frac{P}{h^2}. \quad (3.3.2)$$

Підставимо отриманий вираз  $\frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}} = K_T \cdot \varepsilon_t$ :

$$1,5 \cdot 10^{-3} = 0,0486 \cdot K_T \frac{P}{h^2} \rightarrow h^2 = \frac{0,0486 \cdot 2,1 \cdot P}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,068 \cdot 10^3 \cdot P,$$

де  $K_T=2,1$

Отже шукана формула для висоти ПЕ:

$$h = \sqrt{0,068 \cdot 10^3 \cdot P} \text{ [мм]}.$$

В таблицю зведені розраховані значення товщин робочої частини ПЕ для номінальних навантажень, а також значення  $h$ :

Таблиця 3.1

$P_n$ , мс	1,2	1,6	2	2,5	3	4
$h_{\text{расч}}$ , мм	8,87	10,24	11,45	12,79	14,02	16,19
$h_{\text{прин}}$ , мм	9	10,5	11,5	13	14	16
$P_n$ , мс	5	6	8	10	12	16
$h_{\text{расч}}$ , мм	18,1	19,82	22,9	25,59	28,04	32,37
$h_{\text{прин}}$ , мм	18	20	23	25,5	28	32,5

### 3.4. Розрахунок основних характеристик датчика

1) Статична характеристика.

Статичну характеристику датчика визначимо по статичній структурній схемі, що була розроблена в розділі 3.2. Виходячи з схеми, яка представлена на рис.3.13 статична характеристика датчика виражається залежністю[6]:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} K_T \frac{h}{2r} \cdot \varphi, \quad (3.4.1)$$

де  $r=28$  мм,  $U_{\text{жив}}=24$  В,  $K_T=2.1$ . Кут нахилу  $\varphi$  дотичної до нейтрального перерізу робочої частини ПЕ є функцією навантаження  $P$  та товщини ПЕ –  $h$  і був визначений в пункті як:  $\varphi = 2,621 \cdot \frac{P}{h^3}$ , де навантаження представлено в [мс], а товщина в [мм].

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		47

Виходячи з вищесказаного статичну характеристику датчика зведемо до залежності сигналу на виході датчика  $U_{\text{вих}}$  від сигналу на вході  $P$ , тобто [10]:

$$U_{\text{вих}} = K(h) \cdot P, \quad (3.4.2)$$

де  $K(h)$ :

$$K(h) = \frac{24 \cdot 2,1 \cdot h \cdot 2,621}{2 \cdot 28 \cdot h^3} = \frac{2,36}{h^2} \text{ [В/мс]}.$$

Розрахуємо значення коефіцієнту  $K$  для прийнятих значень товщин ПЕ представлених в таб.3.1. Результати розрахунку зведемо в таб.3.2.

Таблиця 3.2

$P_n$ , мс	1,2	1,6	2	2,5	3	4
$h_{\text{прин}}$ , мм	9	10,5	11,5	13	14	16
$K$ , $10^{-3}$ В/мс	30	23	18	14	12	9
$P_n$ , мс	5	6	8	10	12	16
$h_{\text{прин}}$ , мм	18	20	23	25,5	28	32,5
$K$ , $10^{-3}$ В/мс	7,2	6	4,5	3,6	3	2,3

По даним таб.3.2 Побудуємо графіки статичних характеристик датчика при різних номінальних навантаженнях.



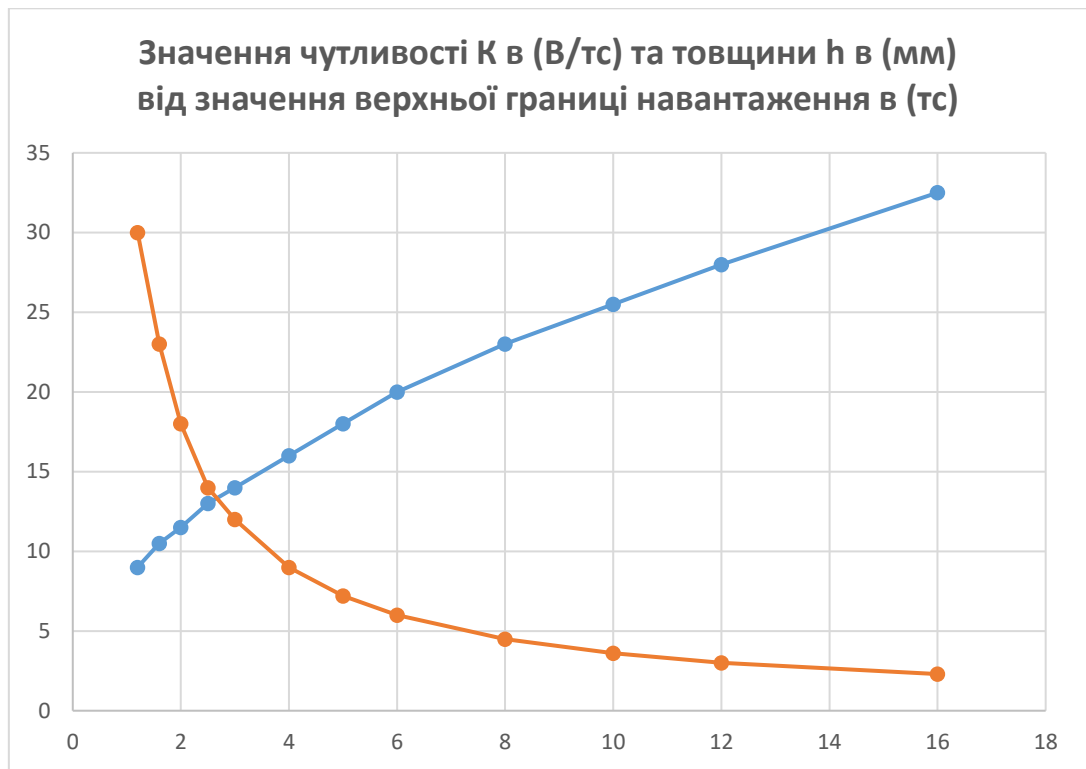


Рисунок 3.16 – Графіки статичних характеристик

## 2) Динамічні характеристики

Для визначення динамічних характеристик датчика необхідно визначити його передаточну функцію в динамічному режимі. Структурна схема датчика в динамічному режимі представлена на рис.3.16

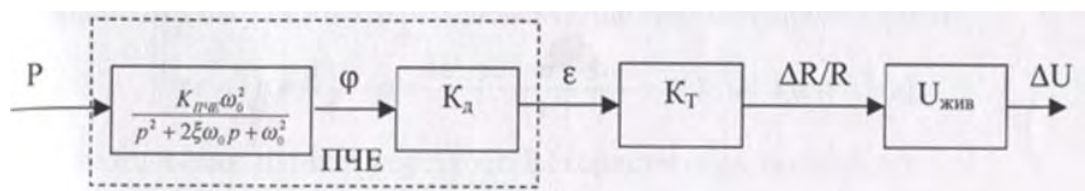


Рисунок 3.17 – Передаточна функція

Отже передаточна функція датчика дорівнює:

$$W(p) = \frac{K \omega_0^2}{p^2 + \xi \omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (3.4.3)$$

де  $K$  - коефіцієнт, що представлений в таб.6.1 для різних номінальних навантажень,  $\omega_0$  - частота власних коливань пружного елемента,  $\xi$  – коефіцієнт заспокоєння ПЕ.

Як видно динаміка всієї системи визначається властивостями пружного елемента. Визначимо  $\omega_0$  і  $C$ .

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

Так як явного демпфера в конструкції датчика немає і демпфірування коливань відбувається в самому матеріалі пружного елемента, то вибираємо  $\xi=0.1$  типовий для таких систем.

Пружний елемент при деяких спрощеннях є системою з одним ступенем свободи. Його вільні гармонічні коливання описуються наступним диференціальним рівнянням [11]:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (3.4.4)$$

де  $M$ -маса, що коливається (в даному випадку це маса силовідного елемента або силовідного елемента і вантажу, вага якого вимірюється),  $c$  – коефіцієнт демпфірування,  $k$  – коефіцієнт лінійної жорсткості.

Запишемо представлене диференціальне рівняння у вигляді [11]:

$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3.4.5)$$

де  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{Mk}}$  – коефіцієнт заспокоєння,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$  – частота власних коливань. Знайдемо  $M$  – масу силовідного елемента, що має циліндричну форму:

$$M = V\rho \approx \frac{d^2\pi h}{4} \cdot \rho = \frac{38^2 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 0,487 \text{ [кг]}.$$

Для знаходження лінійної жорсткості  $k$  скористаємось залежністю [7]:

$$\varphi = 2,621 \cdot \frac{P}{h^3} \Rightarrow P = \frac{1}{2,621} h^3 \varphi. \quad (3.4.6)$$

Отже при дії навантаження в  $P$  тс робоча частина ПЕ повернеться на кут  $\varphi$ , при цьому уявний центр ПЕ переміститься на відстань  $x = \varphi \cdot r$ , де  $r=28$  мм – середній радіус кільцевої робочої частини ПЕ. З цих виразів отримаємо:

$$P = \frac{1}{2,621} \cdot \frac{h^3}{r} x = kx,$$

Де  $k = \frac{1}{2,621} \cdot \frac{h^3}{r} \left[ \frac{mc}{мм} \right] = \frac{1}{2,621} \cdot \frac{h^3}{r} \cdot 10^7 \left[ \frac{H}{м} \right]$  – коефіцієнт лінійної жорсткості.

Знаючи  $k$  знайдемо вираз для частоти власних коливань ПЕ:

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		50

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{h^3 \cdot 10^7}{2,621 \cdot r \cdot M}} \left[ \frac{1}{c} \right].$$

Зведемо в таблицю 3.3 частоти коливань ПЕ датчики в Гц –  $f = \frac{1}{2\pi} \omega_0$  розрахованих на різні номінальні навантаження без навантаження і з граничним навантаженням.

Таблиця 3.3

Номінальне навантаження датчика, тс	Товщина робочої частини датчика, мм	Частоти коливань ПЕ датчика, Гц	
		Без навантаження	З номінальним навантаженням
1	2	3	4
1,2	9	$2,27 \times 10^3$	45,7
1,6	10,5	$2,86 \times 10^3$	49,9
2	11,5	$3,28 \times 10^3$	51,2
2,5	13	$3,94 \times 10^3$	55,0
3	14	$4,41 \times 10^3$	56,1
4	16	$5,38 \times 10^3$	59,4
5	18	$6,43 \times 10^3$	64,4
6	20	$7,53 \times 10^3$	67,8
8	23	$9,28 \times 10^3$	72,4
10	25,5	$10,8 \times 10^3$	75,6
12	28	$12,5 \times 10^3$	79,4
16	32,5	$15,6 \times 10^3$	86,0

Знаючи частоту власних коливань робочої частини ПЕ можемо знайти перехідну динамічну характеристику датчика, яка є відповіддю системи на одиничний ступінчастий сигнал (рис.3.17).

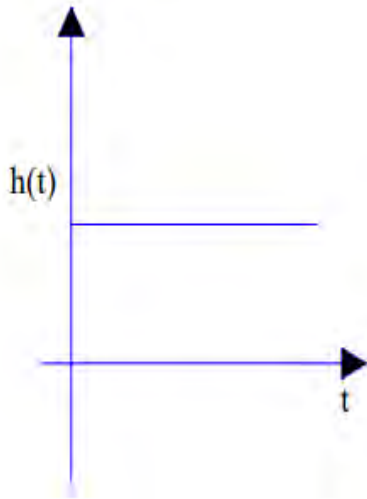


Рис. 3.18 – Ступінчастий сигнал

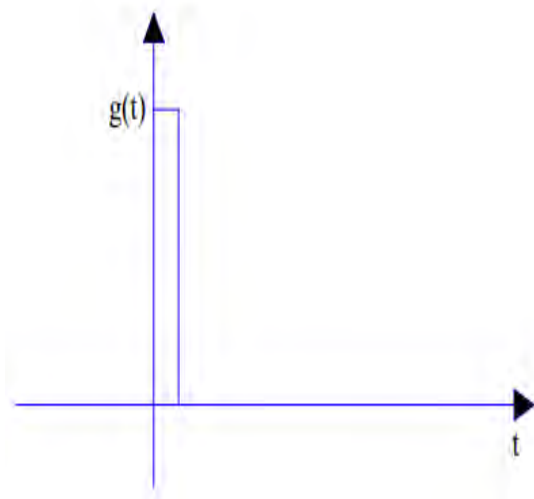


Рис. 3.19 – Імпульсний сигнал

Датчик, що розробляється, порядку, для якої перехідна функція буде мати вигляд [14]:

$$h(t) = K \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_2 - p_1} p^{p_1 t} + \frac{p_1}{p_1 - p_2} p^{p_2 t} \right) \right], \quad (3.4.7)$$

де  $p_1, p_2$  – корні характеристичного рівняння  $p^2 + \xi \omega_0 p + \omega_0^2 = 0$ .

Так як  $\xi < 0$ , то корні комплексно спряжені і дорівнюють:

$$\begin{cases} p_1 = -\omega_0 (\xi - j\sqrt{1 - \xi^2}) \\ p_2 = -\omega_0 (\xi + j\sqrt{1 - \xi^2}) \end{cases}. \quad (3.4.8)$$

Якщо підставити ці вирази в рівняння перехідної функції і здійснити перехід від комплексного виразу до тригонометричного, можна отримати перехідну функцію у вигляді:

$$h(t) = K \left[ 1 - e^{-\xi \omega_0 t} \left( \cos \sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 t + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 t \right) \right].$$

Імпульсну характеристику датчика  $g(t)$ , де відповідь на імпульс безмежно малої тривалості (рис. 3.14), можна отримати із співвідношення [14]:

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (3.4.9)$$

Отже імпульсна характеристика даної системи:

$$g(t) = e^{-\xi\omega_0 t} \left[ \xi\omega_0(K+1)\cos\sqrt{1-\xi^2}\omega_0 t + \omega_0 \left( \frac{K\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} - \sqrt{1-\xi^2} \operatorname{in}\sqrt{1-\xi^2}\omega_0 t \right) \right]$$

Для знаходження частотних характеристик датчика перетворимо передаточну функцію в комплексний вид:

$$W(j\omega) = \frac{K\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2\xi\omega_0\omega - \omega^2}, \quad (3.4.10)$$

$$W(j\omega) = K\omega_0^2 \left( \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2} - j \frac{2\xi\omega_0\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2} \right),$$

Тоді амплітудно-частотна характеристика системи [6]:

$$K(\omega) = \frac{K\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2}} = \frac{K}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}. \quad (3.4.11)$$

Фазочастотна характеристика [6]:

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = -\operatorname{arctg} \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (3.4.12)$$

### 3.5. Розрахунок схеми компенсації температурних похибок

Для компенсації похибок, що виникають під час роботи датчика при відхиленні температури від нормальної, використовується наступна схема:

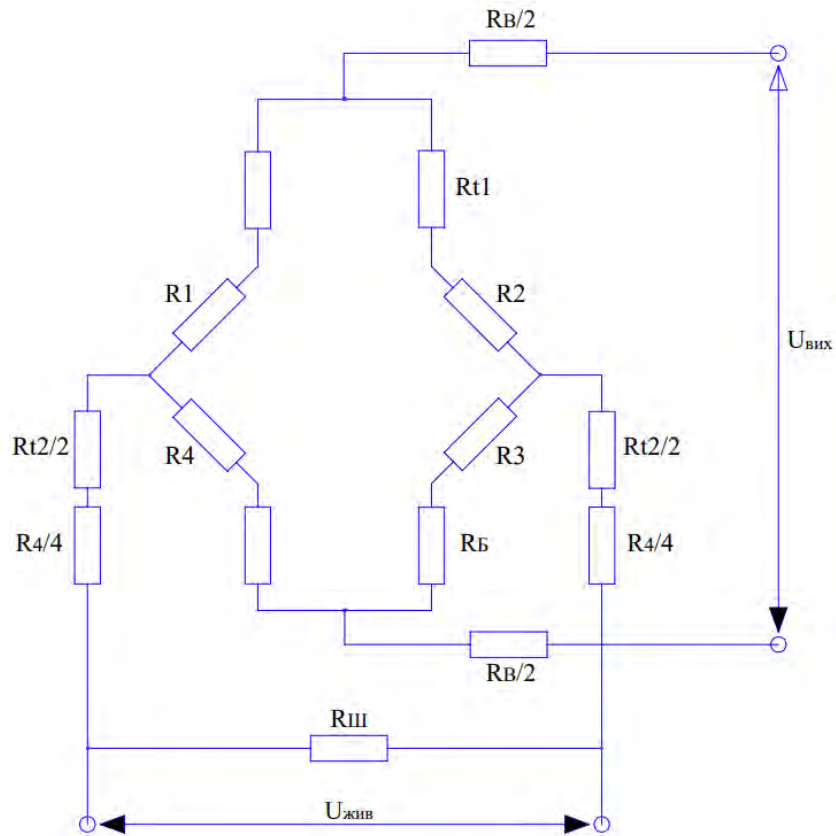


Рисунок 3.20 – Схема для компенсації похибок

де  $R_1, R_2, R_3, R_4$  - опори пліч;  $R_{\delta}$  - резистор регулювання початкового коефіцієнта передачі (ПКП);  $R_{ч}$  - резистор регулювання робочого коефіцієнта передачі (РКП);  $R_{t1}$  резистор регулювання температурної зміни ПКП;  $R_{t2}$  - резистор регулювання температурної зміни РКП;  $R_{В}$  резистор регулювання вихідного опору;  $R_{ш}$  резистор регулювання вхідного опору.

Коефіцієнт передачі [6] по напрузі до мостового ланцюга датчика дорівнює:

$$K = \left[ \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\delta R_i}{R_0} \pm \frac{R_{\delta}}{R_0} \pm \frac{R_{t1}}{R_0} \right) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\Delta R_i}{R_0} \right] \left[ 1 - \frac{R_{ч} R_{t2}}{R_0} \right], \quad (3.5.1)$$

де  $\Delta R_i = R_i k_t \epsilon_i$  - збільшення опору  $R_i$  пліч моста, викликане деформацією чутливого елемента;  $\delta R$  - відхилення опорів пліч моста від номінального значення.

Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

Знак  $\pm$  означає, що плечі моста, у яку включені резистори  $R_{t2}$  і  $R_{t1}$  визначаються при регулюванні датчика  $R_0$ , який являє собою номінальний опір пліч моста.

Вираз для коефіцієнта передачі можна розкласти з точністю до малих другого порядку на чотири додатки, що мають різний фізичний зміст: початковий коефіцієнт передачі при нормальних умовах  $K$ , його температурна зміна  $\Delta_t K$ , робочий коефіцієнт передачі при нормальних умовах  $\Delta K$  і його температурна зміна  $\Delta_t[\Delta K]$  [6]:

$$K = K_0 + \Delta_t K_0 + \Delta K + \Delta_t[\Delta K], \quad (3.5.2)$$

$$K_0 = \frac{1}{4} \left[ \sum_{i=0}^4 (-1)^{i+1} \frac{\delta R_i}{R_0} \pm \frac{R_{0t1}}{R_0} \right] \left[ 1 - \frac{R_q R_{t2}}{R_0} \right];$$

$$\Delta_t K_0 = \frac{1}{4} \left[ \sum_{i=0}^4 (-1)^{i+1} \beta_i \pm \frac{R_{0t1}}{R_0} \beta_{t1} \right] \left[ 1 - \frac{R_q R_{t2}}{R_0} \right];$$

$$\Delta K = \Delta K_M \left[ 1 - \frac{R_q R_{t2}}{R_0} \right];$$

$$\Delta_t[\Delta K] = \Delta K \left[ \alpha - \frac{R_{0t1}}{R_0 - R_q - R_{0t2}} \beta_{t2} \right] \Delta t$$

Через  $\Delta K_M$  позначений РКП мостового ланцюга при рівних нулю значеннях опорів регулювальних резисторів, тобто коли  $R_q = R_{t2} = 0$ . Через  $\Delta t$  позначене відхилення фактичної температури датчика від температури при нормальних умовах,  $\alpha$  - температурний коефіцієнт модуля Юнга пружного елемента.  $R_{0t1}$ ,  $R_{0t2}$  - опору відповідних резисторів при нормальних умовах. РКП  $\Delta K_M$  виражається наступною формулою [11]:

$$\Delta K_M = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^4 (-1)^{i+1} k_t \varepsilon_i, \quad (3.5.3)$$

Передбачається, що температурний коефіцієнт опору (ТКО) резисторів  $R_4$  і  $R_8$ , виготовлених з константану, безмежно малий у порівнянні з ТКО резисторів  $R_{t1}$  і  $R_{t2}$ , виготовлених з міді.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		55

Вхідний опір мостового ланцюга датчика  $R_{\text{вх}}$  і вихідний опір  $R_{\text{вих}}$  дорівнюють:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{ш}}[R_0 \pm \delta R_i + nR_0]}{R_{\text{ш}} + R_0 \pm \delta R_i + nR_0};$$

$$R_{\text{вих}} = R_0 \pm \delta R_i + R_{\text{вх}};$$

$$n = \frac{R_{\text{ч}} + R_{t2}}{R_0}$$

Технічними умовами і стандартами на тензорезисторні датчики нормуються усі вирази, що складаються для коефіцієнта передачі, вхідний і вихідний опори:

$$[K_0] \leq \delta K_0;$$

$$[\Delta K[P_H] - \Delta_H K[P_H]] \leq \delta |\Delta K[P_H]|;$$

$$\left| \frac{\Delta_t K_0}{\Delta t} \right| \leq \delta_{t1};$$

$$\left| \frac{\Delta_t [\Delta K[P_H]]}{\Delta K[P_H] \Delta t} \right| \leq \delta_{t2};$$

$$|R_{\text{вх}} - R_{\text{вх}}^H| \leq \delta R_{\text{вх}};$$

$$|R_{\text{вих}} - R_{\text{вих}}^H| \leq \delta R_{\text{вих}}.$$

Символом  $\delta$  позначене гранично припустиме значення відповідного нормованого параметра, індекс «Н» означає номінальне значення відповідної величини.

Розрахуємо необхідні значення опорів, розглядаючи самий несприятливий з погляду статистики випадок, коли в плечах моста знаходиться по одному тензорезистору і через відсутність усереднення випадкових розкидів характеристик тензорезисторів необхідні найбільші відносні значення номіналів регульовальних резисторів для перекриття ймовірних полів відповідних допусків.

Нелінійні ефекти в подальших розрахунках не беруться до уваги так як визначаються номінальні значення, а точність компенсації не розглядається.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		56



На тій же підставі при алгебраїчних перетвореннях допускаються спрощення, що приводять до деякого збільшення номінальних значень, тобто до створення запасу по діапазону регулювання.

Вирішуючи отриману систему нерівностей відповідно до викладених вимог, і, прийнявши, що номінальне значення регульовального елемента повинне дорівнювати максимально можливому його значенню, що може знадобитися для задоволення умов, що нормують. Після спрощення одержимо:

$$R_{\delta}^H = \left[ 4 \frac{\delta\beta_{i \max}}{\beta_{t1}} + 4 \frac{\delta R_{i \max}}{R_0} \right] R_0;$$

$$R_{0t1}^H = 4 \frac{\delta\beta_{i \max}}{\beta_{t1}} R_0;$$

$$R_{\check{c}}^H = \left[ 1 - \frac{\Delta_H K [P_H]}{\Delta K_M [P_H]} \right] R_0 = \frac{\delta_P [\Delta_H K [P_H]]}{\Delta K_M [P_H]};$$

$$R_{\text{ш}}^H = \frac{R_0^2 [1 + n]^2}{R_0 [1 + n] - R_{\text{вх}}^H};$$

$$R_{\text{в}}^H = R_{\text{вих}}^H - R_0 + \delta R_{i \max}.$$

Обчислимо номінальні значення нормуючих опорів, виходячи з наступних заданих величин:

$R_0=100$  Ом – номінальний опір пліч моста;

$\delta\beta_{i \max}=2 \times 10^{-6}$  1/С° – гранично припустиме відхилення температурного коефіцієнта опору мідних резисторів;

$\delta R_{i \max}=2$  Ом – гранично припустиме відхилення опору відповідного плеча мосту від номіналу;

$\beta_{t1}=4,2 \times 10^{-3}$  1/С° температурний коефіцієнт опору міді;

$\alpha=2 \times 10^{-4}$  1/С° температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу пружного елемента – сталі 40Х;

$\Delta K_M [P_H]=1,5 \times 10^{-3}$  – робочий коефіцієнт перетворення;

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		57

$\delta[\Delta K_M[P_H]] = 0,2 \times 10^{-2}$  – граничне відхилення від номінального значення РКП.

Нижче представлені отримані результати обчислень номінальних значень опорів:

$$R_{\delta}^H = 8,38 \text{ Ом};$$

$$R_{0t1}^H = 8,38 \text{ Ом};$$

$$R_{0t2}^H = 0,7 \text{ Ом};$$

$$R_{\psi}^H = 13 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{III}}^H = 52 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{B}}^H = 42 \text{ Ом}.$$

### 3.6. Аналіз точності

Характеристикою точності датчика є основна похибка – найбільш ймовірна похибка датчика в заданих експлуатаційних умовах. Основна погрішність визначається як геометрична сума складових [10]:

$$\delta = \sqrt{\psi^2 + \sigma^2 + \gamma^2 + \gamma_{\Gamma}^2 + \beta^2 + \alpha^2}. \quad (3.6.1)$$

Для розрахованого ряду датчиків значення погрішності, що складаються, наступні:

$\psi = 0,02\%$  - систематична складова похибки (без похибок калібрування);

$\sigma = 0,02\%$  - середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки;

$\gamma_{\Gamma} = 0,025\%$  - гістерезис;

$\gamma = 0,006\%$  - нелінійність;

$\beta = 0,015\%$  - зміна НКП при зміні температури на  $10 \text{ C}^{\circ}$ ;

$\alpha = 0,015\%$  - зміна РКП при зміні температури на  $10 \text{ C}^{\circ}$ .

При геометричному підсумовуванні цих складових одержуємо значення основної похибки датчика:  $\delta = 0,045\%$ .

У деяких випадках експлуатації похибка виміру датчиком може бути знижена за рахунок тієї чи іншої складової загальної похибки. Одним з

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		58

найбільш ефективних способів зниження похибок є здійснення калібровки датчика при тій же температурі, при якій буде вимірюватися зусилля.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		59

## Висновок

У рамках цього дипломного проекту було проведено детальне дослідження транспортно-пакувальних ліній та систем вагового контролю, а також їх аналогів на ринку. Здійснений аналіз дозволив виявити потребу в розробці автоматизованої лінії, яка б поєднувала функціональність пакування продукції з точним контролем ваги.

Проект передбачав розробку нового алгоритму роботи транспортно-пакувальної лінії з системою вагового контролю, що гарантує швидкий та безпомилковий процес пакування з мінімальною участю оператора. Було розроблено й розраховано датчик, який забезпечує точне вимірювання ваги продукції та передачу даних до системи керування.

Основними результатами дипломного проекту є:

1) Розроблений алгоритм роботи автоматичної транспортно-пакувальної лінії, який забезпечує автоматизований процес пакування продукції з контролем ваги.

2) Впроваджена система вагового контролю, що забезпечує точне вимірювання ваги продукції та надійну ідентифікацію відхилень від заданих параметрів.

3) Спроектований датчик, який використовується для вимірювання ваги продукту на лінії.

Дана робота вдосконалила процес пакування продукції шляхом автоматизації та впровадження системи вагового контролю. Розроблені алгоритм та датчик сприяють поліпшенню якості продукції, ефективності виробничих процесів та забезпеченню дотримання заданих вагових параметрів

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		60

## Література

1. IMPULS. Монтаж друкованих плат [Електронний ресурс] / IMPULS – Режим доступу до ресурсу: <https://impulse.ua/index.php/ua/contract-manufacturing-ua/a-large-scale-processing-line-ua>
2. Автоматичний формувальник коробів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.upakovka.com.ua/ukr/item/karton-korob/mashina-dlya-formirovaniya-kartonnih-korobok>.
3. Лінія автоматичного фасування борошна [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://technowagy.com.ua/products/liniya-avtomatichnogo-fasuvannya-muky-tehnovagi/>
4. RTN [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.hbm.com/en/2208/rtn-ring-torsion-load-cell-for-process-engineering/?product\\_type\\_no=RTN%20Ring%20Torsion%20Load%20Cell%20Also%20For%20Heavy%20Loads](https://www.hbm.com/en/2208/rtn-ring-torsion-load-cell-for-process-engineering/?product_type_no=RTN%20Ring%20Torsion%20Load%20Cell%20Also%20For%20Heavy%20Loads)
5. Тензодатчики [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://asvik.kiev.ua/ua/articles/5>.
6. Гросман Н. Я. Автоматизовані системи зважування та дозування / Н. Я. Гросман, Г. Д. Шнирєв. – Москва: Машиностроение, 1988. – 296 с.
7. Sensortronics [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://all-pribors.ru/opisanie/16975-03-6a-10662>.
8. ZEMIC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zemic.com.ua/ua/zemic-products/tenzodatchiki/vibuhozahishheni-datchiki/tenzometrisheskij-tenzodatchik-bm8d/>.
9. FLINTEC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://flintec.com.ua/index.php?page=products2>.
10. Зайцев В. М. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ / В. М. Зайцев, О. К. Нікітін. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 68 с.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		61

11. Проектування датчиків для вимірювання механічних величин / Под ред. Е.П.Осадчего. - М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.

12. Тимошенко С.П. Опір матеріалів. - М.: Наука, 1965. -480с.

13. Тимошенко С.П., Войновський-Кригер С. Пластини і оболочки. Переклад с англійського. - М.: Видавництво «Наука». Головна редакція фізико-математичної літератури. 1966. - 635с.

14. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1970. - 392 с.

					<b>ДП.ПМ-п01.01.1760.00.000.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		62

