

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудування

Приладобудування

«На правах рукопису»

УДК 600.2.008

(універсальна десятична класифікація.

Для визначення УДК конкретної дисертації

студенту слід звернутися в 1-й зал бібліотеки)

«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: Двоканальний вимірювальний перетворювач навантаження
із термокомпенсацією

Виконав : студент 2 курсу, групи ПІ-71мп

(шифр групи)

_____ Чапаєв Дмитро Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Гераїмчук Михайло Дем'янович

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

(підпис)

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

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(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

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		8

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-вимір-
вальна 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

_____ Чапаєву Дмитру Максимовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Двоканальний вимірювальний перетворювач навантаження із термокомпенсацією

науковий керівник дисертації д.т.н, проф., Гераїмчук Михайло Дем'янович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпись	Дата		9

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

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018р

3. Об'єкт дослідження Вимірювання маси в нестандартних температурних умовах

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Аналіз впливу температурної похибки та вибір методу її усунення

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести аналіз методів вимірювання маси в нестандартних температурних умовах; Дослідити основні фактори виникнення температурних похибок; Проаналізувати основні методи усунення температурної похибки для даного типу вимірювання; Провести теоретичні дослідження температурної похибки та методів її виключення; Провести експериментальні дослідження з імітації високотемпературного впливу та визначення характеристик датчика; Аналіз отриманих результатів; Висновки.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу 6.1 Основні методи вимірювання ваги в нестандартних температурних умовах – 1 арк. ф. А1; 6.2. Фактори виникнення температурної похибки та методи її подолання – 1 арк. ф. А1; 6.3. Лист представлення результатів повірки тензOMETричного датчика – 1 арк. ф. А1; 6.4. Лист графіків, характеристик та залежностей, що виникають при дії високих температур – 1 арк. ф. А1; 6.5 Лист графічних залежностей та характеристик результатів лабораторних досліджень – 1 арк. ф. А1; 6.6 Презентаційний лист – 1 арк. ф. А1;

7. Орієнтовний перелік публікацій 7.1 Розробка тензOMETричного перетворювача із термокомпенсацією

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		

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

									Лист	
Изм.	Лист	№ документа	Підпись	Дата	МД ПІ71мп.00.012. ПЗ					10

--	--	--	--

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	03.09.18	
2	Огляд і аналіз літератури	10.09.18 – 18.09.18	
3	Аналіз методів вимірювання ваги в нестандартних умовах	19.09.18 – 23.09.18	
4	Аналіз методів термокомпенсації	23.09.18 – 30.09.18	
5	Розробка математичної моделі	01.10.18 – 05.10.18	
6	Аналітичне дослідження	08.10.18 – 12.10.18	
7	Експериментальні дослідження	15.10.18 – 02.11.18	
8	Оформлення МД та її графічної частини	05.11.18	
9	Представлення МД на перевірку науковому керівнику	19.11.18	
10	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів сервісом Unichек	30.11.18	

Студент

_____ (підпис)

Д.М. Чапаєв
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

М.Д. Гераїмчук
(ініціали, прізвище)

Изм.	Лист	№ документа	Підпись	Дата

МД ПІ71мп.00.012. ПЗ

Лист

11

Реферат

Обсяг магістерської дисертації складає 96 сторінок. В роботу включено 62 рисунки, 31 таблиця, список літератури(8 найменувань) і додатки.

Задача постановки ваговимірювального процесу в нестандартних умовах постає у багатьох галузях промисловості: ливарній металургійній, лісовій деревообробній, будівельній, харчовій, тощо.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання ваги з допомогою тензOMETричних ваг в нестандартних температурних умовах.

Предметом дослідження є двоканальний вимірювальний перетворювач навантаження із компенсацією температурної похибки.

Метою дослідження є компенсація температурної похибки тензOMETричних ваг та підвищення точності показів.

Методи дослідження базуються на моделюванні комп'ютерного експерименту у програмному середовищі MATLAB та постановці реального експериментального дослідження з ціллю перевірки деяких теоретичних тверджень та впровадження нових.

Задачі дослідження включають аналіз впливу температурної похибки на хід та результат ваговимірювального процесу та вибір способу її усунення.

Актуальність обраної теми виражається у потребі точного контролю показань тензодатчика протягом ходу вимірювального процесу в нестандартних температурних умовах.

Ключові слова: методи компенсації, похибка, вимірювання ваги, температурна похибка, тензOMETрія в нестандартних умовах.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		12

Реферат

Объем магистерской диссертации составляет 96 страниц. В работу включены 62 рисунка, 31 таблица, список литературы (8 наименований) и приложения.

Задача постановки весоизмерительного процесса в нестандартных условиях возникает во многих отраслях промышленности: литейной металлургической, лесной деревообрабатывающей, строительной, пищевой и др.

Объектом исследования является процесс измерения веса с помощью тензометрических весов в нестандартных температурных условиях.

Предметом исследования является двухканальный измерительный преобразователь нагрузки с компенсацией температурной погрешности.

Целью исследования является компенсация температурной погрешности тензометрических весов и повышения точности показаний.

Методы исследования базируются на моделировании компьютерного эксперимента в программной среде MATLAB и постановке реального экспериментального исследования с целью проверки некоторых теоретических утверждений и внедрения новых.

Задачи исследования включают анализ влияния температурной погрешности на ход и результат весоизмерительного процесса и выбор способа ее устранения.

Актуальность выбранной темы выражается в необходимости точного контроля показаний тензодатчика в течении хода измерительного процесса в нестандартных температурных условиях.

Ключевые слова: методы компенсации, погрешность, измерения веса, температурная погрешность, тензометрия в нестандартных условиях.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

Das Referat

Der Umfang der Masterarbeit beträgt 96 Seiten. Die Arbeit umfasst 62 Abbildungen, 31 Tabellen, eine Liste von Referenzen (8 Positionen) und Anwendungen.

Die Aufgabe, den Wiegeprozess unter außergewöhnlichen Bedingungen festzulegen, stellt sich in vielen Branchen: Gießerei-Metallurgie, Holzverarbeitung, Bauwesen, Lebensmittel usw.

Gegenstand der Studie ist der Prozess der Gewichtsmessung mit Dehnungsmessstreifen unter nicht standardmäßigen Temperaturbedingungen.

Gegenstand der Studie ist ein zweikanaliger Messaufnehmer mit Temperaturfehlerkompensation.

Ziel der Studie ist es, den Temperaturfehler des DMS zu kompensieren und die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Die Forschungsmethoden basieren auf der Simulation eines Computer-Experiments in der MATLAB-Software-Umgebung und der Formulierung einer echten experimentellen Studie, um einige theoretische Aussagen zu testen und neue einzuführen.

Zu den Zielen der Studie gehören die Analyse der Auswirkung von Temperaturfehlern auf den Verlauf und das Ergebnis des Wiegevorgangs sowie die Wahl, wie dieser zu beseitigen ist.

Die Relevanz des gewählten Themas drückt sich in der Notwendigkeit aus, die Messwerte der Wägezelle während des Messvorgangs bei nicht standardmäßigen Temperaturbedingungen präzise zu steuern.

Schlüsselwörter: Kompensationsmethoden, Fehler, Gewichtsmessungen, Temperaturfehler, Dehnungsmessstreifen unter nicht standardmäßigen Bedingungen.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА ВИЗНАЧЕНЬ

Вступ.....	10
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ.....	13
1.1 Методи вимірювання ваги.....	13
1.2 Засоби вимірювання ваги.....	16
1.3 Висновки.....	31
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	32
2.1 Розробка та аналіз математичної моделі Тензометричного перетворювача.....	32
2.2 Аналіз методів компенсації температурної похибки.....	53
2.3 Аналіз впливу температурної похибки на ваговимірювальну систему.....	69
2.4 Висновки.....	72
3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	74
3.1 Опис експериментальної установки.....	74
3.2 Схема передачі розміру навантаження.....	76
3.3 Розробка методики експериментального дослідження вимірювального перетворювача.....	77
3.4 Висновки.....	78
4. Розробка стартап-проекту «Тензометричні ваги з системою компенсації температурної похибки».....	79
4.1 Опис ідеї проекту.....	79
4.1.1. Технологічний аудит проекту.....	81
4.2 Аналіз ринкових можливостей проекту.....	81
4.3 Розробка ринкової стратегії проекту.....	87
4.4 Висновки.....	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	95

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА
ВИЗНАЧЕНЬ

НТ-напівпровідниковий тензодатчик;

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки;

ТКС – температурний коефіцієнт опору;

РКП – робочий коефіцієнт передачі;

ε - деформація досліджуваної деталі, е.о.д ;

μ - коефіцієнт Пуассона;

m - коефіцієнт зміни питомого опору матеріалу від деформації;

S_T - коефіцієнт тензочутливості тензорезистора;

g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ;

S – чутливість пружного чутливого елемента;

R – електричний опір, Ом;

I – сила струму, А;

U – електрична напруга, В;

ε – деформація;

F – сила, Н;

P – навантаження, кг;

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

ВСТУП

На сьогоднішній день класичні механічні ваги все рідше зустрічаються в сучасній ваговимірвальній індустрії у зв'язку із глобальною модернізацією. На зміну приходять вдосконалені електронні вагові прилади. Щоденно асортимент вимірвальної техніки поповнюється представниками із найрізноманітнішими можливостями і сферами застосування. Серед постійно зростаючого асортименту можна вибрати вагову техніку майже для будь-яких потреб. З'являються нові галузі, а з ними постають і нові вимоги до вимірвальних пристроїв, створюються нові стандарти, робочі умови змінюються в сторону автоматизації.

Сучасність рясніє багатством галузей, у яких необхідна реалізація ваговимірвального процесу, зокрема у металургії, харчовій, лісовій, хімічній, тощо. У наш час ваговимірвальний процес може проводитись у нестандартних або навіть екстремальних умовах і бажано із мінімальною похибкою, а отже втручання людини у хід вимірвального процесу не лише небажане а й небезпечне і поступово зводиться до мінімуму. Автоматизований ваговимірвальний процес сьогодні важко уявити без використання тензометричних датчиків. На відміну від механічних ваг, які потребували набагато більше часу для вимірювання ваги і давали результат із сумнівною точністю, тензодатчики дозволяють не лише автоматизувати процес вимірювання ваги за допомогою зменшення впливу людини на результат вимірвального процесу, а й досягти нових характеристик точності за рахунок суттєвого зменшення похибки вимірювань.

Для вимірювання ваги в нестандартних або екстремальних умовах виготовляються спеціалізовані тензометричні датчики із покращеними фізико-хімічними властивостями та метрологічними характеристиками. Наприклад у хіміко-фармацевтичній промисловості використовуються тензорезистори високої чутливості, що дозволяють зафіксувати більший діапазон деформації чутливого елемента і як наслідок призначені для

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		17

вимірювання малих мас із великою точністю, оскільки при виготовленні медикаментів це грає дуже важливу роль. Не дивлячись на наявну різноманітність тензометричних датчиків для вимірювання ваги, зокрема представлених і на ринку України, всіх їх об'єднує одна властивість – в незалежності від того, якому класу точності відповідає тензодатчик чи того, якими метрологічними характеристиками він володіє, в результаті вимірювання в тій чи іншій мірі наявна похибка.

Проблема точного зважування виникла у зв'язку із впливом сторонніх збурюючих факторів, що є недопустимим, важкодоступних місць, де є проблематично коректно встановити тензометричний датчик, що прямо впливає на точність результату вимірювального процесу, або небезпечного середовища, де перебування людини не рекомендоване. Тензодатчики призначені для використання в якості складового компоненту ваговимірювальної системи, які можуть бути встановлені в будь-якій точці світу. З огляду на широку географію їх використання, тензодатчик повинен володіти достовірністю показань незалежно від пори року і континенту на якому його використовують. Зміна температури навколишнього середовища значно впливає на тензодатчик через температурне розширення матеріалу, що тягне за собою зміну опору і коефіцієнта чутливості. Для усунення такої проблеми в процесі конструювання тензометричних датчиків застосовуються різні способи термокомпенсації.

В даній роботі буде розглянуто та проаналізовано вплив температури на покази ваговимірювальної системи, методи компенсації похибки.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ

Всі ваги побудовані за принципом вимірювання сили впливу на ваги при навантаженні. В електронних вагах сила впливає на первинний перетворювач (датчик). Датчик складається з пружних елементів і спіралі, яка перетворює деформацію в електричні сигнали.

Базовим пристроєм сучасних систем вимірювання ваги, є тензометричні датчики, конструкція яких заснована на пружному механічному елементі, який піддається деформації з нанесеним на нього тензометричним мостом, що складається з тензорезисторів, з'єднаних в різні електричні схеми. При впливі на датчик зовнішнього навантаження, в слідстві деформації, порушується симетрія вимірювального моста і на вимірювальних висновках виникає електричний сигнал пропорційний прикладеному впливу на датчик. Параметром таких датчиків є робочий коефіцієнт передачі - РКП і становить для різних моделей 1мВ/В, 2мВ/В, 5мВ/В, 10мВ/В.

Цифрові тензодатчики в своїй конструкції мають вбудований аналого-цифровий перетворювач - АЦП і перетворювач інтерфейсу, як правило цифровий сигнал про вагу передається по RS-485 інтерфейсу, що дозволяє проводити встановлення платформи віддалено від вагового терміналу. По типу тензодатчики відрізняються конструкцією, яка визначає область застосування і спосіб установки в вантажопідйомний пристрій. Розглянемо конструкції тензорезисторних датчиків і їх використання.

Найпростішими є одноточкові датчики, що застосовуються у виготовленні платформних ваг малої вантажопідйомності, обладнанні для фасування, а також в побутових електронних вагах, торгових і лабораторних засобах вимірювання ваги.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		19

1.1 Методи вимірювання ваги[1]

Магнітопружний ефект або Ефект Віларі обумовлює в матеріалах, що піддаються навантаженню, зміну їх магнітної сприйнятливості. Подібні матеріали використовують при виготовленні осердя обмотки, значення повного опору якої знижується зі збільшенні навантаження внаслідок зменшення магнітної сприйнятливості. Чутливі елементи такого типу володіють високою потужністю вихідного сигналу, що дозволяє використовувати їх без підсилювача але їх характеристики мають недостатньо великий діапазон лінійності для проведення точних вимірювань.

В індуктивних датчиках ваги зміна індуктивності обмотки викликається зміщенням залізного сердечника під дією вимірюваного зусилля. Особливе значення в області ваговимірювальної техніки мають пристрої з декількома змінними індуктивностями або пристрої зі змінною взаємоіндуктивністю.

Індуктивні датчики ваги володіють порівняно великим значенням вихідної напруги, вони менш чутливі до дії температури, вологості або великих переміщень якоря. Завдяки вищеописаним властивостям у датчиках цього типу можна використовувати м'які пружини, що в свою чергу забезпечує датчик високим коефіцієнтом чутливості до малих деформацій але у порівнянні із тензOMETричними датчиками вони все одно менш точні.

У датчика ваги з електромагнітною силовою компенсацією платформа вагів з'єднана важелем з компенсуючою електромагнітною котушкою, яка знаходиться під впливом поля постійного магніту. Датчик положення, що пов'язаний з підсилювачем, керує силою струму котушки. Струм в обмотці компенсаційної котушки змінюватиметься до тих пір поки не здійсниться умова рівноваги. Зміна навантаження на платформі ваг приводить до зміни відповідно сили струму в обмотці, що є мірою ваги вантажу.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		20

Ваговимірювальні датчики з вібруючою струною

Принцип дії ваговимірювального датчика із вібруючою струною ґрунтується на збудженні високочастотних коливань натягнутої струни за допомогою швидких електромагнітних імпульсів системи і прикладенні ло струни зусилля, з яким діє вантаж на платформі вагів за допомогою системи важелів.

Вищеописане зусилля натягує струну і відповідно збільшує частоту її вібрації. За зміною частоти коливань струни можна визначити вагу вантажу, що знаходиться на платформі. ідає дискретний сигнал. За допомогою таких датчиків можна досягати високої точності вимірювання ваги.

Вищеописані датчики застосовують у ваговимірювальних системах нечасто, так як точність їх показань залежить від умов навколишнього середовища. Для забезпечення правильності показань, необхідно підтримувати в визначених межах величину температури, рівень зовнішніх вібрацій у вузьких межах, вологість повітря, атмосферний тиск та.ін.

У кварцевих датчиках процес вимірювання ваги включає вимір частоти прикріпленого до пружного елементу кварцового кристалу, параметри якого залежні від умов навколишнього середовища. Кристал приводить в рух прикладена сила. Подібні датчики не користуються високою популярністю в сучасних ваговимірювальних системах та технологіях з тієї ж причини що і попередній вид.

У гідравлічних датчиках вага визначається шляхом вимірювання тиску, що чинить навантаження на вагову платформу, яку підтримують поршні гідравлічної системи. Манометр вимірює тиск рідини. Коефіцієнт тертя виключає конструкція з гумовою мембраною. Датчики цього типу допускають відхилення напрямку діючого зусилля до 4° від вимірювальної вертикалі без додаткових похибок. При найбільшому навантаженні вигин гумової мембрани становить від 1 до 3 мм. Похибка вимірювання складає $\pm 0,2\%$. Найбільші межі зважування від 50 кг до 500 т.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		21

Для зважування із використанням радіоактивних ізотопів можна користуватися декількома методами: методом розсіювання або методом просвічування.

При використанні методу просвічування вимірюють поглинання випромінювання вантажу, що зважується. Застосування жорсткого випромінювання дозволяє вважати значення масового коефіцієнта ослаблення незалежним від хімічного складу матеріалу. У першому випадку відбувається екранізація прямого випромінювання. Матеріал розсіює бічне випромінювання і спрямовує в вимірювальний пристрій. Ваги даного типу досить часто використовують у якості автомобільних ваг що працюють у екстремальних умовах навколишнього середовища, у яких звичайні ваги не здатні працювати тривалий проміжок часу. Похибка може сягати кількох відсотків.

До найбільш точних ваговимірюючих пристроїв можна віднести датчики ваги з тензорезистивними сприймаючими елементами. Похибка ваг даного типу відповідає діапазону похибок торгових терезів. Разом із тензорезисторами в датчик встановлено регулюючі опори, що застосовують для калібрування мостової схеми. Дана властивість забезпечує взаємозамінність компонентів датчиків і можливість інтеграції в ваговимірювальну систему декількох датчиків. Величина вихідної напруги становить 1–2 мВ / В відносно до 1 В напруги живлення датчика при номінальному навантаженні. Навантаження більше номінального більш ніж на половину не викликає зміщення нуля. При п'ятикратному перевантаженні механічні пошкодження також відсутні.

До складу тензометричного датчика входять пружний елемент і тензорезистори, прикріплені до нього. пружний елемент деформується при навантаженні ваг, в залежності від ваги. Цю деформацію сприймають тензорезистори, які змінюють свій опір у якості відповідної реакції. У

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		22

вимірювальному ланцюзі зміна опору перетворюється в зміну напруги, пропорційно навантаженню, яке діє на чутливий елемент.

Тензорезистори широко застосовуються в вагах завдяки численним та істотним перевагам, а саме:

- високоякісні тензорезистивні елементи
- Технологічний процес виготовлення датчиків не потребує використання дорогого обладнання
- Значний час експлуатації
- Стабільність вихідного сигналу
- Компенсація впливу зовнішніх факторів реалізується впровадженням нескладних технологічних засобів та простих модифікацій вимірювальної схеми
- Відмінне співвідношення відносно низької ціни та хороших метрологічних характеристик

1.2 Засоби вимірювання ваги

У наш час наявні різноманітні тензометричні перетворювачі із різними метрологічними характеристиками та призначенням, існування яких зумовлене наявністю різноманітних вирішуваних завдань у різних сферах та умов навколишнього середовища. Найпоширенішими серед них усіх є:

- Дротові резистивні (проста технологія виготовлення та висока надійність, малоінерційні;

Принцип вимірювання - зміна опору тензочутливої решітки датчика у результаті деформації чутливого елемента викликає зміну електричного сигналу у схемі;

- Фольгові, аналогічні за принципом та матеріалами, технологія виготовлення – електрохімічне травлення (Даний вид резистивних елементів має велику площу поверхні контакту з матеріалом, що зменшує розігрів датчика,

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		23

збільшуючи при цьому стабільність його показів за умови впливу критичних температур і тривалих у часі навантажень);

- Плівкові резистивні елементи (виготовляються методом напилення матеріалу із високим коефіцієнтом опору на підкладку з високим питомим опором, виготовлену із сапфіру);

- напівпровідникові тензорезистори (вирізаються з монокристалу германію, кремнію, або сульфїду самарію, власний опір яких змінюється під дією навантаження) ключовою і унікальною особливістю є можливість зміни власних електричних та механічних властивостей на широкому проміжку, що неможливо при використанні дротяних та фольгових тензорезисторів; володіють великим значенням вихідного сигналу та мають великий термін служби, відносно невеликі розміри і великий коефіцієнт тензочутливості; до недоліків належать малий запас механічної міцності та нелінійність характеристик, мала гнучкість та висока чутливість до зовнішніх чинників;

- п'єзоелектричні тензорезистори (виготовляють з монокристалічного кремнію на інтегральних ЧЕ, зі стисненням якого виникає явище прямого тензоефекту або потенціал; Дякуючи зміні питомого опору п'єзоелектричного тензорезистора при деформації даний вид перетворювачів володіє високим коефіцієнтом чутливості);

- У різних наукових та технічних сферах зустрічаються також оптоволоконні та інші види тензодатчиків.

Теперішній вигляд тензорезистора являє собою приклеєний ЧЕ на деталі, виготовлений із тензочутливого матеріалу. Виводи ЧЕ дозволяють під'єднати його до електричного ланцюга у вигляді мостової схеми Уїнстона із тензорезисторами. Деякі тензорезистори володіють спеціальною підкладкою, розташованою між чутливим елементом і досліджуваною деталлю, яка дозволяє легко встановити його у потрібне місце, а також розташований зверху на ЧЕ захисний елемент.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		24

Поширеність тензорезисторів можна пояснити їх малою інерційністю, можливістю дистанційних багатоточкових вимірювань, простотою установки та відсутністю спотворень щодо деформацій досліджуваної деталі. Відносно невелика маса і розміри тензорезистора дозволяють легко розмістити його у важкодоступних місцях та встановлювати його на деталь в момент збирання конструкції.

Передана із допомогою ЧЕ деформація ε досліджуваної деталі викликає зміну опору тензорезистора, залежного від деформації вздовж вимірювальної осі (вимірювальною віссю є вісь ЧЕ тензорезистора, напрямком якої співпадає із напрямком вісі його чутливості) тензорезистора, коефіцієнтів передачі та перетворення деформації K_n та $K_{пер}$ відповідно та опору R , тобто

$$\Delta R_\varepsilon = f(R, \varepsilon, K_{пер}, K_{пр})$$

Але, у встановленому на досліджуваній деталі тензорезисторі, під час досліджень виникають процеси, які призводять до зміни його опору і залежні від властивостей тензорезистора, умов експерименту, часу вимірювань, температури, тощо.

Зміна опору залежить окрім як від деформації поверхні, ще й від сторонніх факторів впливу, які впливають на експериментальні дослідження. Доцільніше буде охарактеризувати тензорезистивні елементи системою метрологічних характеристик, кожна з яких відображає одну із його властивостей.

Наявні в системі метрологічні характеристики умовно розділені на ті, які зв'язані з наступними вимірювальними параметрами:

- Деформацією вздовж вимірювальної осі тензорезистора (інформативна частина вхідного сигналу), чутливістю та перетворюючою деформаційною функцією за нормальних температурних умов;
- Із безпосередньою чутливістю тензорезистора до деформації що перпендикулярна до його вимірювальної вісі, - поперечна чутливість;
- Вимірювальною деформацією та часом її впливу - повзучість та механічний

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		25

гістерезис;

- Із температурним впливом (температурна характеристика опору, функціональна залежність чутливості від температури, фактор повзучості за умови впливу максимальної температури) та дрейф вихідного сигналу.

Напівпровідникові тензодатчики[5] використовують п'єзорезистивний ефект - зміну питомого електричного опору при механічних навантаженнях. Вони володіють у кілька десятків разів більшою чутливістю ніж металеві, але володіють дуже великим температурним коефіцієнтом опору та великий коефіцієнт нелінійності перетворюючої функції. Даний тип датчиків використовують в умовах невеликих температурних змін та грає важливу роль чутливість і не має потреби у високій точності вимірювань. Похибка даного виду датчиків коливається в межах кількох відсотків.

Коефіцієнт чутливості напівпровідникового тензорезистора можна описати наступним рівнянням:

$$S = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = \pi_1 E$$

де $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ – відносна зміна довжини напівпровідникового тензорезистора; E – модуль поздовжньої пружності матеріалу напівпровідникового тензорезистора. Напівпровідникові тензодатчики володіють дуже високим коефіцієнтом тензометричної чутливості (понад 150). Дещо меншим буде коефіцієнт у наклеєних на ЧЕ тензорезисторів, ніж у тих, які перебувають у несклеєному стані, за рахунок впливаючого шару клею.

Переважає більшість тензорезисторів даного типу виготовляються із кремнію. Кристали таких тензорезисторів, що використовують на практиці, як правило піддають легуванню для збільшення величини питомого опору до приблизно 0,2 Ом/см. Пластину тензорезистора вирізають із монокристалу кремнію, далі шліфують та користуються методом фото- або електрохімічного травлення для отримання необхідної товщини (0.03 - 0.05 мм) або отримують

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		26

витягуванням з переохолодженого напівпровідникового розплаву (дендріди германію і кремнію).

Напівпровідниковий тензорезистор можна також отримати шляхом кристалізації парів кремнію, в ході чого вони набувають ниткоподібної форми.

Напівпровідникові тензодатчики чутливі до ударів, вібрацій, ядерної радіації та інших видів зовнішнього впливу, але основним чинником, який викликає похибки у вимірюванні навантаження, є варіативність температури навколишнього середовища, що обмежує їх застосування.

Його вихідний сигнал можна представити в наступному вигляді:

$$U_0 = f(p, t)$$

Звідси можна виділити повний диференціал напівпровідникового тензорезистора:

$$dU_0 = \left(\frac{\partial U_0}{\partial p} \right)_t dp + \left(\frac{\partial U_0}{\partial T} \right)_p dT$$

Після лінеаризації вираз набуває вигляду:

$$U_0 = S_{Tp}p + S_T T$$

де S_{Tp} і S_T - чутливості тензорезистора відповідно по тиску і температурі.

Статичні характеристики тензорезисторів лінійні в межах $\pm 1.5\%$ від верхньої межі вимірювань тому лінеаризація допустима. Температурні характеристики тензорезистора повинні бути представлені у наступному вигляді:

$$(U_0)_T = f_1(t); \quad T = f_2(t)$$

Будова сталевого тензодатчика складається із підставки з прикріпленим до неї резистором. Вимірюване навантаження перетворюється в силу з допомогою ЧЕ. Під дією сили підставка із прикріпленим резистивним елементом змінює свої геометричні розміри (стискається або розтягується) та відповідно до цього змінюється опір тензорезистора під дією механічного навантаження. Діюча сила спричинить подовження або стиснення тензометричної решітки тензорезистора, що в свою чергу призведе до пропорційної зміни його опору:

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		27

$$R = \frac{\rho L}{A}; \frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta L}{L}$$

де S - тензочутливість (від 2,0 до 4.5 для металів), $\frac{\Delta L}{L}$ – відносна деформація проволоки тензорешітки.

Конструкція наклеюваного тензодатчика складається із провідимої фольги чи тонкої проволоки, прикріпленої до пласкої пластини. Отримана конструкція в подальшому наклеюється на основу. Тензорезистор зазвичай встановлюється в напрямку вимірюваної сили, щоб його вимірювальна вісь збігалась із вимірювальною віссю дослідження. Вищеописані тензорезистори володіють високими ізоляційними характеристиками, відносно невеликою площею поверхні та малим витокком.

Найбільш популярними серед усіх приклеюваних тензорезисторів є фольгові. Виготовлення даних датчиків реалізують за методом фото-чи електровитравлення і використовують ті ж метали, що і у випадку з дротяними тензорезисторами, а саме: ніхром, як найбільш часто використовуваний, константан або нікелево – залізний сплав, тощо. Металофольговий тензодатчик володіє хорошим коефіцієнтом теплового розсіювання, великою площею, що зменшує саморозігрів датчика і перешкоджає його виходу з ладу, стабільними характеристиками у відносно широкому діапазоні температур, малим поперечним перерізом.

Дротові тензорезистивні елементи володіють малою площею контакту із підставкою, за рахунок чого зменшуються струми витокку при впливі високотемпературного середовища та надає покращені ізоляційні характеристики між чутливим елементом та його основою. З іншого боку, фольгові чутливі елементи мають велике відношення площі поверхні до площі поперечного перерізу що прямим чином впливає на чутливість і за рахунок цього робить їх більш стабільними при впливі високих або екстремальних температур чи довготривалих навантажень. Велика поверхнева площа тензорезистора та його малий поперечний переріз обумовлюють хороший

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		28

ступінь температурного контакту ЧЕ із його підставкою, що зменшує саморозігрів тензорезистора та збільшує його коефіцієнт теплового розсіювання.

Тензодатчики балочного типу

Балочні тензометричні датчики на зсув чи вигин використовують у побудові платформних ваг, бункерів, систем дозування, підлогових систем зважування, включаючи електронні ваги для зважування тварин, тощо.

S-подібні тензометричні датчики

S-подібні тензодатчики використовують у кранових вагах для зважування вантажу, а також в підвісних системах, при цьому пружний елемент із тензорезистивними чутливими елементами працює на розтяг. У випадку із крановими вагами, це мобільні рішення, суть технології зважування заключається в підвішуванні ваг за вантажозахватний пристрій крану, а зважуваний вантаж фіксується на платформі ваг вантажозахватним пристроєм, після чого вантаж підіймають та фіксують його вагу.

Тензодатчик торсіонного типу

При проведенні модернізації залізничних, механічних чи автомобільних ваг, а також при виробництві сучасних електронних платформених ваг для транспорту, застосовують даний вид тензодатчиків, що комплектуються вузлами вбудовування. Інтеграція тензодатчика у вузол вбудовування забезпечує надійне закріплення та переміщення трикуланих датчиків баштового типу.

При розробці особливих рішень та реалізації вимірювальних завдань у ваговимірювальних системах, виробники тензометричних датчиків пропонують проектування та виготовлення тензодатчиків за індивідуальним замовленням. Рішення такого виду обмежують універсальність та

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

взаємозамінність тензодатчиків різних виробників і роблять систему зважування більш вузькоспеціалізованою.

Тензодатчики торсіонного типу застосовуються у високоточних системах виміру ваги з високою найбільшою границею зважування, у якості пружного елемента використовують кільцевий пружний елемент, під час впливу на який відбувається пружна деформація скручування.

Тензодатчики компанії Zemic

Із усього різноманіття датчиків ваги, представлених на ринку України, виділяються найбільш якісні і доступні торгові марки. Одним із фаворитів у цій галузі є компанія Zemic[2]. Ця компанія володіє власною науково-дослідною базою, відмінною системою контролю якості та випробувальним обладнанням. Датчики виробляються на основі міжнародних стандартів якості ISO 9001. Їх якість підтверджується міжнародними сертифікатами OIML і NTEP. B8D - тензометричний датчик на зсув балочного типу, виробництва компанії Zemic. Даний тип датчиків використовується для виготовлення платформних ваг та ваговимірювальних систем. Датчик B8D компанії Zemic представлено на рис. 1.



Рис.1 Тензодатчик балочного типу B8D фірми Zemic

Цей датчик виступає в ролі одного з масових конструктивних виконань, які застосовуються в промисловій ваговимірювальній галузі. Завдяки низькому профілю і високим метрологічним характеристикам цей тип

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

датчиків знаходить широке застосування в багатьох промислових ваговимірювальних системах.

Датчик володіє наступними фізичними характеристиками:

- ◆ Навантаження: від 0.25т до 5т
- ◆ Матеріал виконання: нержавіюча сталь
- ◆ Клас захисту IP67

У табл. 1 представлено його технічні характеристики

Таблиця 1 Технічні характеристики тензодатчика В8D

№ п/п	Параметр	Значення			
		1	Навантаження	0.25 – 5 т	
2	Клас точності	C2	C3	A5M	B10M
3	Максимальна кількість повірочних інтервалів	2000	3000	5000	10000
4	Мінімальний повірочний інтервал	$\frac{E_{max}}{5000}$	$\frac{E_{max}}{10000}$	$\frac{E_{max}}{15000}$	$\frac{E_{max}}{10000}$
5	Загальна похибка	$\leq \pm 0.030$	$\leq \pm 0.020$	$\leq \pm 0.026$	$\leq \pm 0.050$
6	Повзучість	$\leq \pm 0.024$	$\leq \pm 0.016$	$\leq \pm 0.017$	$\leq \pm 0.040$
7	Температурне відхилення чутливості	$\leq \pm 0.017$	$\leq \pm 0.011$	$\leq \pm 0.013$	$\leq \pm 0.040$
8	Температурне відхилення нуля	$\leq \pm 0.023$	$\leq \pm 0.015$	$\leq \pm 0.014$	$\leq \pm 0.020$
9	Вихідна чутливість	3.0±0.008			
10	Вхідний опір	350±3.5 Ом			
11	Вихідний опір	350±3.5 Ом			
12	Діапазон термокомпенсації	-10~+40 °C			

13	Робочий діапазон температур	-35~+65 °С
----	-----------------------------	------------

На рис. 2 показана електрична схема тензометричного датчика В8D

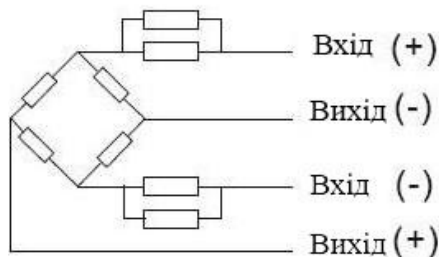


Рис. 2 Електрична схема тензодатчика В8D

На рис. 3 показано ще один датчик фірми Zemic.



Рис.3 Тензодатчик HM11 фірми Zemic

Балочний тип датчиків, який застосовується для виготовлення платформених ваг та ваговимірювальних систем.

Має корпус із нікелевим покриттям, виготовлений із застосуванням технології лазерного зварювання і має клас захисту IP68(повна пиле- та вологозахищеність). Його характеристики представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 Технічні характеристики тензодатчика HM11

№ п/п	Параметр	Значення			
		C2	C3	A5M	B10M
1	Навантаження	0.005 – 0.5 т			
2	Клас точності	C2	C3	A5M	B10M
3	Максимальна кількість повірочних інтервалів	2000	3000	5000	10000

4	Мінімальний повірочний інтервал	$\frac{E_{max}}{5000}$	$\frac{E_{max}}{10000}$	$\frac{E_{max}}{15000}$	$\frac{E_{max}}{10000}$
5	Загальна похибка	$\leq \pm 0.030$	$\leq \pm 0.020$	$\leq \pm 0.026$	$\leq \pm 0.050$
6	Повзучість	$\leq \pm 0.024$	$\leq \pm 0.016$	$\leq \pm 0.017$	$\leq \pm 0.040$
7	Температурне відхилення чутливості	$\leq \pm 0.017$	$\leq \pm 0.011$	$\leq \pm 0.013$	$\leq \pm 0.040$
8	Температурне відхилення нуля	$\leq \pm 0.023$	$\leq \pm 0.015$	$\leq \pm 0.014$	$\leq \pm 0.020$
9	Вихідна чутливість	2.0±0.02			
10	Вхідний опір	460±50 Ом			
11	Вихідний опір	351±2.0 Ом			
12	Діапазон термокомпенсації	-10~+40 °C			
13	Робочий діапазон температур	-35~+70 °C			

На рис.4 представлено електричну схему датчика.



Рис. 4 Електрична схема тензодатчика НМ11

1.2 Тензодатчики компанії Keli Sensor[3]

Компанія спеціалізується на виробництві високоточних датчиків для вагових систем ґрунтуючись на новітньому обладнанні, що використовується у виробництві і передових дослідженнях. Продукція компанії Keli Sensor виробляється строго дотримуючись стандартів якості OIML R60 і ISO 9001: 2000 і володіє наступними властивостями:

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		33

- корозійностійкість
- водонепроникність
- вибухо- та іскробезпека
- стійкість до ударних навантажень

Датчик виробництва компанії Keli Sensor представлено на рис. 5.



Рис. 5 Тензометричний датчик АМІ 5-40kg/50-500kg компанії Keli Sensor

Дані одноточкові датчики типу АМІ виготовляють переважно із алюмінію. Вони виконані для використання за схемою single point та володіють покращеною герметизацією. Цей тип датчиків володіє підвищеними метрологічними характеристиками, за рахунок чого він користується популярністю при виготовленні різноманітних ваговимірювальних систем. Даний тензодатчик під'єднується через чотирипровідну схему. Його технічні параметри представлено у табл.3.

Таблиця 3 Технічні характеристики тензодатчика АМІ

№ п/п	Параметр	Значення
1	Номінальне навантаження	5-500 кг
2	Клас точності	C3
3	Чутливість	2.0±0.2mV/V
4	Нелінійність	±0.02% F.S
5	Помилка в показання приладу за рахунок гістерезису	±0.02% F.S
6	Температурне відхилення чутливості	±0.02% F.S/10°C
7	Температурне відхилення нуля	±0.02% F.S/10°C
8	Вхідний опір	404±10Ω

9	Вихідний опір	350±5Ω
10	Ізоляційний опір	≥2000 MΩ
12	Клас точності	C3
13	Чутливість	2.0 ± 0.2mV / V
14	Номінальний діапазон робочих температур	-10 ~ + 40°C
15	Експлуатаційний діапазон температур	-20 ~ + 60°C
16	Нелінійність	± 0.02%
17	Помилка в показання приладу за рахунок гістерезису	± 0.02%
18	Кріп (30 хв)	± 0.02% F.S
19	Температурне відхилення чутливості	± 0.02% F.S / 10°C
20	Температурне відхилення нуля	± 0.02% F.S / 10°C
21	Вхідний опір	404 ± 10Ω
22	Вихідний опір	350 ± 5Ω

Для більшої наочності отриманої інформації температурні характеристики основних моделей тензодатчиків компанії Zemic представлено у табл.4.

Таблиця 4 Температурні характеристики[4] основних моделей тензодатчиків компанії Zemic

№ п/п	Шифр моделі	Робоча температура	Температура термокомпенсації
1	HM9B	від -35 до +65 °C	від -10 до +40 °C
2	H3	від -35 до +65 °C	від -10 до +40 °C
3	DHM9B	від -35 до +65 °C	від -10 до +40 °C
4	H8C	від -30 до +80 °C	від -10 до +40 °C
5	HM9A	від -35 до +65 °C	від -10 до +40 °C

6	BM14K	від -30 до +80 °С	від -10 до +40 °С
7	BM14G	від -30 до +80 °С	від -10 до +40 °С
8	BM11	від -35 до +65 °С	від -10 до +40 °С
9	L6G	від -35 до +65 °С	від -10 до +40 °С
10	L6D	від -35 до +65 °С	від -10 до +40 °С
11	L6E	від -35 до +65 °С	від -10 до +40 °С
12	BM8D	від -30 до +80 °С	від -10 до +40 °С

1.3 Тензодатчики компанії НВМ[5]

НВМ контрольно-вимірювальні прилади є лідером в області технологій та ринку і пропонує продукти та послуги для широкого спектру застосувань вимірювань в багатьох галузях промисловості. Датчик цієї компанії представлено на рис. 6.



Рис. 6 Датчик NLC фірми НВМ

Даний вид датчиків володіє широким діапазоном вимірюваного навантаження, що є безперечною перевагою при зважуванні габаритних об'єктів, але, як і в попередніх випадках – він володіє вельми обмеженим діапазоном температурної компенсації. Його технічні характеристики представлено у табл. 5.

Таблиця 5 Технічні характеристики тензодатчика NLC

№ п/п	Параметр	Значення
-------	----------	----------

1	Навантаження	0.22 – 4.4 т			
2	Клас точності	D1	C3	C4	C6
3	Максимальна кількість повірочних інтервалів	1000	3000	4000	6000
4	Мінімальний повірочний інтервал	0,0285	0,0100		
5	Чутливість	1,94 мВ/В			
6	Повзучість	± 0.05	± 0.016	± 0.016	± 0.012
7	Температурне відхилення чутливості	± 0.0420	± 0.0140	± 0.0105	± 0.007
8	Температурне відхилення нуля	≤± 0.0400	±0,0140		
9	Вихідна чутливість	2.0±0.02			
10	Вхідний опір	350 – 480 Ом			
11	Вихідний опір	350±2.0 Ом		350±0.12 Ом	
12	Робочий діапазон температур	-30~+40 °С			

Електрична схема підключення тензодатчика представлена на рис.7.



Рис.7 Схема підключення датчика

1.3 Висновки

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		37

З аналізу літературних джерел та наявних представників вимірювальних перетворювачів можна зробити висновок що вони володіють хорошими метрологічними характеристиками і слугуватимуть чудовою базою для розробки та впровадження модернізацій. Аналіз та огляд показав, що незважаючи на те, що прилади володіють відмінними метрологічними характеристиками, трапляються випадки, коли необхідне виготовлення спеціалізованого датчика що доволі затратно як із фінансової точки зору так і з точки зору часу, витраченого на розробку та виготовлення, тому є актуальною розробка простої та ефективної схеми широкоспеціалізованого датчика із покращеними метрологічними характеристиками.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		38

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Розробка та аналіз характеристик математичної моделі тензометричного перетворювача

Динамічні властивості вимірювальних систем, в яких використовуються тензометричні датчики, характеризуються коливальними перехідними процесами. Точне значення ваги вантажу визначається після закінчення певного проміжку часу, необхідного для загасання перехідного процесу на виході системи вимірювання. Динаміка вимірювальної системи з тензометричним датчиком у якості чутливого елемента описується наступним диференціальним рівнянням:

$$m \frac{d^2 y(t)}{d t^2} + c \frac{d y(t)}{d t} + k y(t) = m g l(t)$$

Якщо вхідним сигналом вважати масу, що впливає на датчик, а вихідним сигналом - падіння напруги на тензодатчику, то передаточна функція вимірювальної системи $W(p)$, записана на підставі даного рівняння, матиме вигляд:

$$P(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{g/m}{(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m})}$$

Для отримання одиничного коефіцієнта передачі в статиці необхідно в вимірювальну систему включити послідовно ланка посилення з коефіцієнтом k/g . Тоді передаточна функція вимірювальної системи з підсилюючою ланкою набуде вигляду:

$$W(s) = P(s) \frac{k}{g} = \frac{k/m}{(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m})}$$

$$W(s) = \frac{p_2}{s^2 + p_1 s + p_2}$$

При малому значенні параметра p_1 перехідний процес буде носити коливальний характер і мати значний час встановлення.

Передаточна функція являє собою коливальну ланку другого порядку. Для розрахунку передаточної функції були взяті наступні вихідні дані (таблиця 8):

Таблиця 8 Вихідні параметри тензOMETричного перетворювача

№ п/п	Параметр	Значення	Вим. од
1	Модуль пружності	$2.05 \cdot 10^{11}$	Н/м ²
2	Коефіцієнт Пуасона	0.29	—
3	Модуль зсуву	$8 \cdot 10^{10}$	Н/м ²
4	Густина	7850	кг/м ³
5	Межа міцності при розтягу	625000000	Н/м ²
7	Межа текучості	530000000	Н/м ²
8	Коефіцієнт теплового розширення	$1.15 \cdot 10^{-5}$	К
9	Теплопровідність	49.8	W/(м·К)
10	Питома теплоємність	486	J/(кг·К)
11	Коефіцієнт демпфування матеріалу	$2.05 \cdot 10^{11}$	Не
12	Модуль пружності	$2.05 \cdot 10^{-5}$	Н/м ²

Використовуючи дані таблиці 5 знайдемо змінні a_1, a_2, a_3 :

$$a_1 = 0.5; a_2 = 0.65; a_3 = 1.$$

На основі отриманої передаточної функції можна побудувати математичну модель. На рис. 23 зображено математичну модель тензOMETричного перетворювача у середовищі MATLAB Simulink 2017.

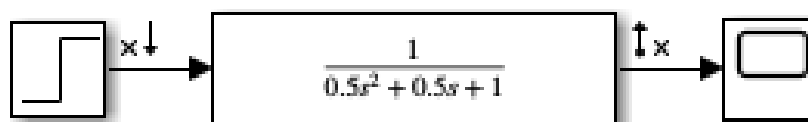


Рис. 23 Математична модель тензOMETричного перетворювача

Характеристики даної системи, отримані після аналізу у вигляді графіків представлені нижче. На рис. 24 зображено перехідну характеристику тензометричного датчика.

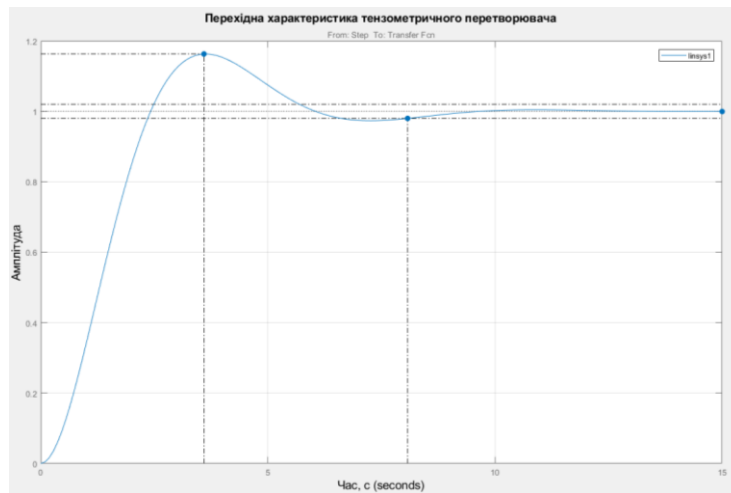


Рис. 24 Перехідна характеристика тензометричного перетворювача

Дана характеристика описує реакцію системи на одиничний скачок. З графіка видно величину перерегулювання, яка складає 16.3% та час перерегулювання, що становить 3.59 с, час встановлення робочого режиму $t_p = 8.08$ с та час заспокоєння збурення системи.

На рис. 25 представлено імпульсну характеристику тензометричного датчика яка відображає реакцію вимірювальної системи на одиничне імпульсне збурення.

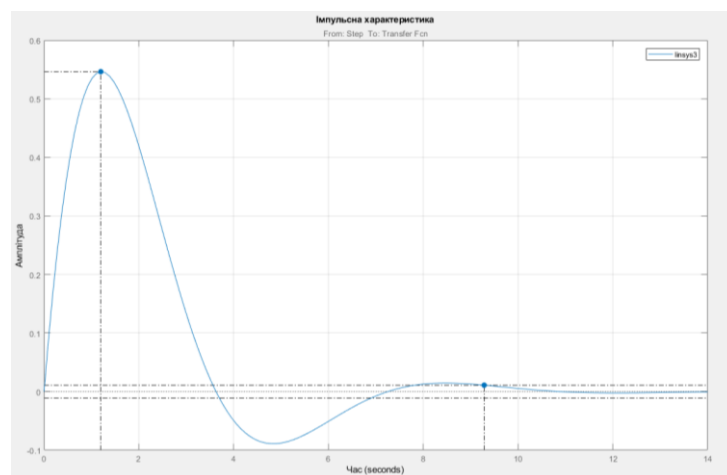


Рис. 25 Імпульсна характеристика тензометричного перетворювача

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		41

З даного графіку добре видно що максимальне значення амплітуди при імпульсному характері збурення становить 0.546 а час встановлення робочого режиму дорівнює 9.29 с.

На рис. 26 показано логарифмічну амплітудно – частотну характеристику, що відображає залежність амплітуди вихідного сигналу системи від частоти її вхідного сигналу.

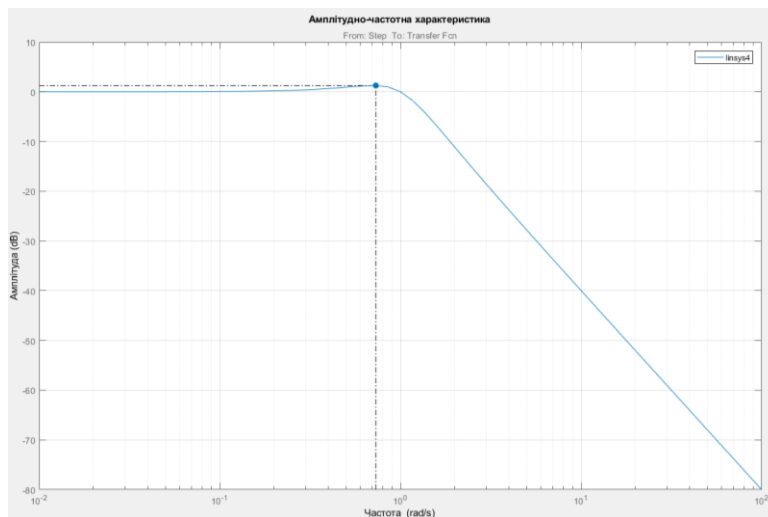


Рис. 26 Логарифмічна амплітудно – частотна характеристика тензометричного перетворювача

Характеристики представлено в логарифмічному масштабі що дає можливість побачити величину смуги пропускання та полоси загородження, частоту зрізу та полюс передаточної функції на частоті 1 рад/с та величину спаду, що дорівнює 10 дБ за декаду.

На рис. 27 продемонстровано логарифмічну фазо–частотну характеристику, що відображає залежність різниці фаз вихідного та вхідного сигналу від частоти сигналу. В теорії автоматичного керування ФЧХ визначається як тангенс відношення уявної частини передатної функції до реальної.

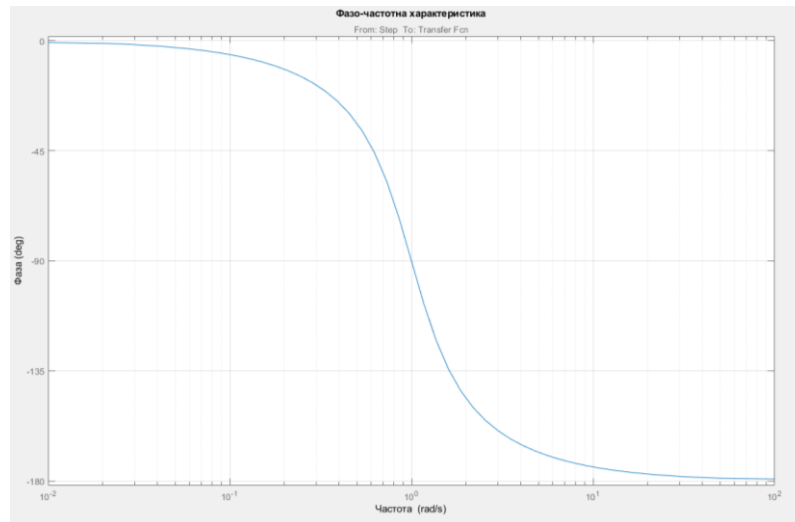


Рис. 27 Логарифмічна фазо – частотна характеристика тензометричного перетворювача

На рис. 28 показано амплітудно–фазочастотну характеристику тензодатчика.

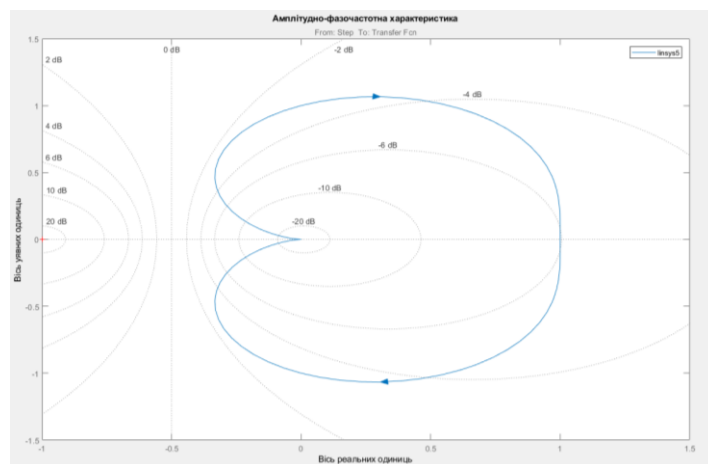


Рис. 28 Амплітудно–фазочастотна характеристика перетворювача

Було проведено підбір оптимальних значень коефіцієнтів передаточної функції. Діапазон зміни першого коефіцієнта склав проміжок від 0.5 до 2.

1) Аналіз із стандартним коефіцієнтом $a_1=0.5$

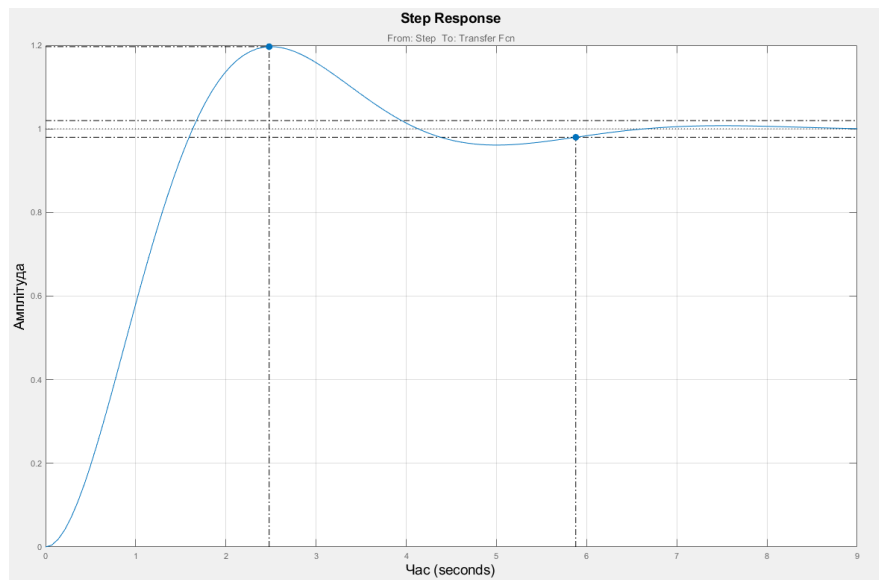


Рис.29 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.5$

Значення максимальної амплітуди рівне 1.2, перерегулювання складає 19.7% на 2.48 с. Час виходу на робочий режим становить 5.88 с.

2) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=0.6$

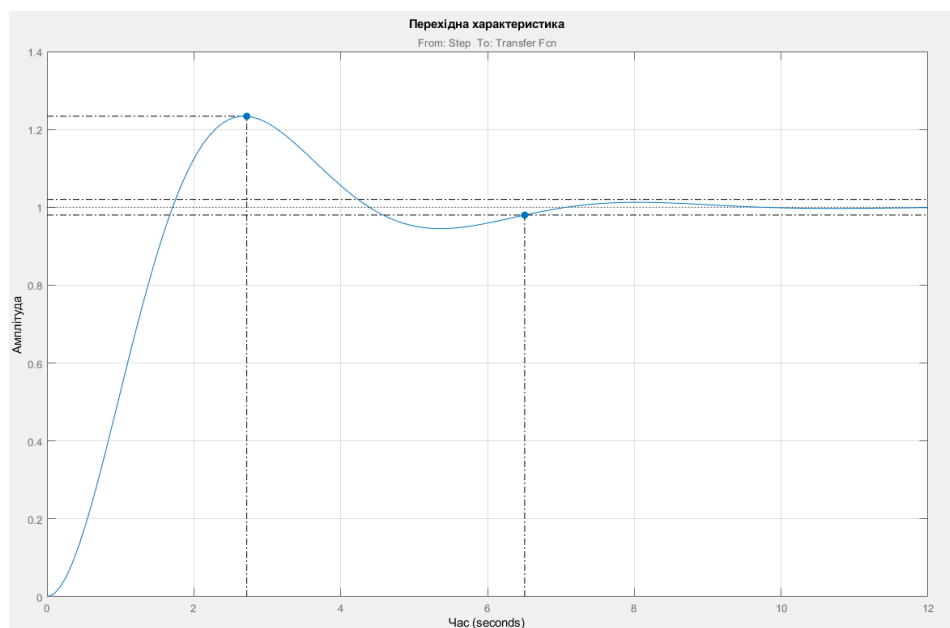


Рис. 30 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.6$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.23, перерегулювання складає 23.4% на 1.72 с. Час встановлення робочого режиму становить 6.51 с.

3) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=0.7$

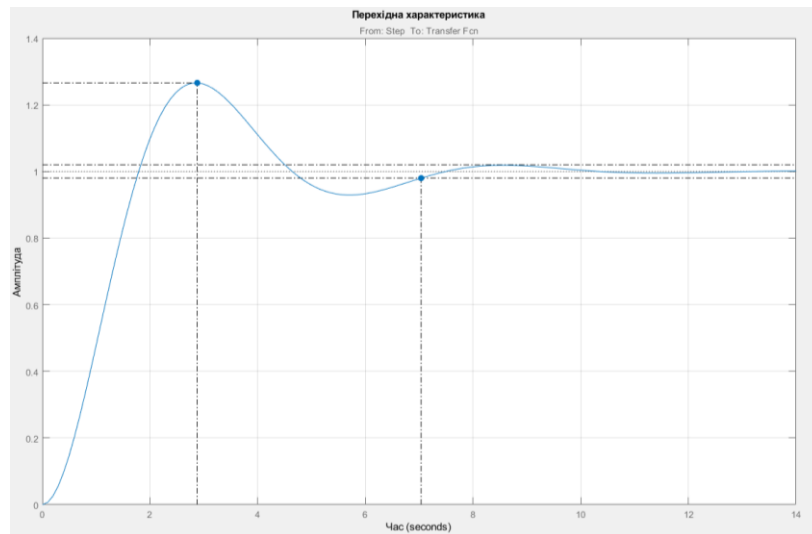


Рис. 31 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.7$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.27, перерегулювання складає 26.6% на 2.88 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.04 с.

4) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=0.8$

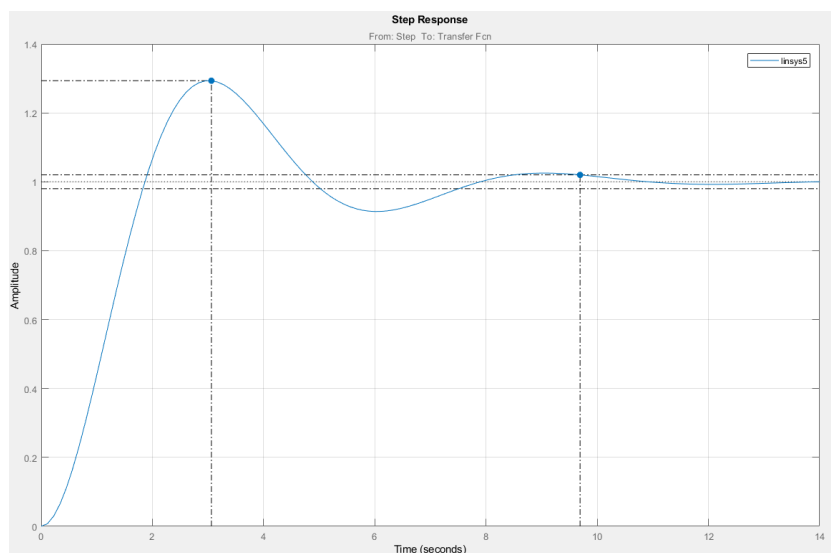


Рис.32 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.8$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.29, перерегулювання складає 29.3% на 3.06 с. Час встановлення робочого режиму становить 9.69 с.

5) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=0.9$

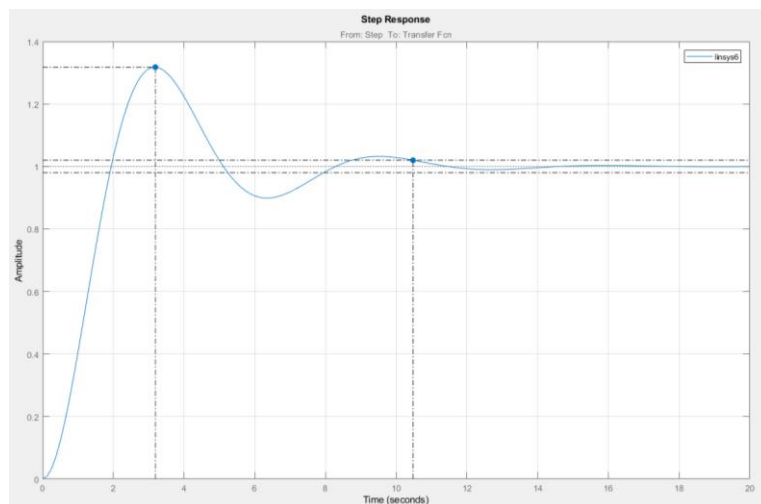


Рис. 33 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.9$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.32, перерегулювання складає 31.8% на 3.19 с. Час встановлення робочого режиму становить 10.5 с.

6) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=1$

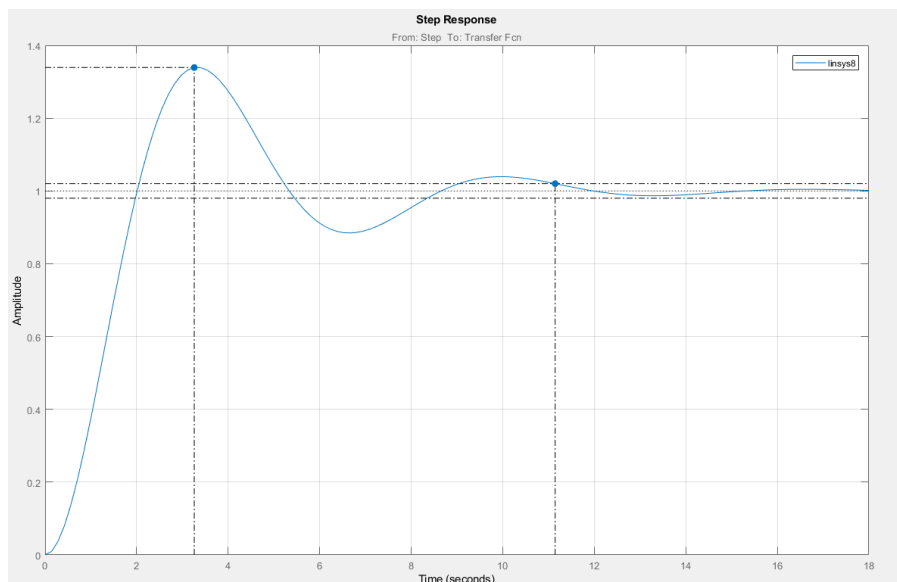


Рис. 34 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=1$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.34, перерегулювання складає 33.9% на 3.26 с. Час встановлення робочого режиму становить 6.51 с.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

7) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=1.1$

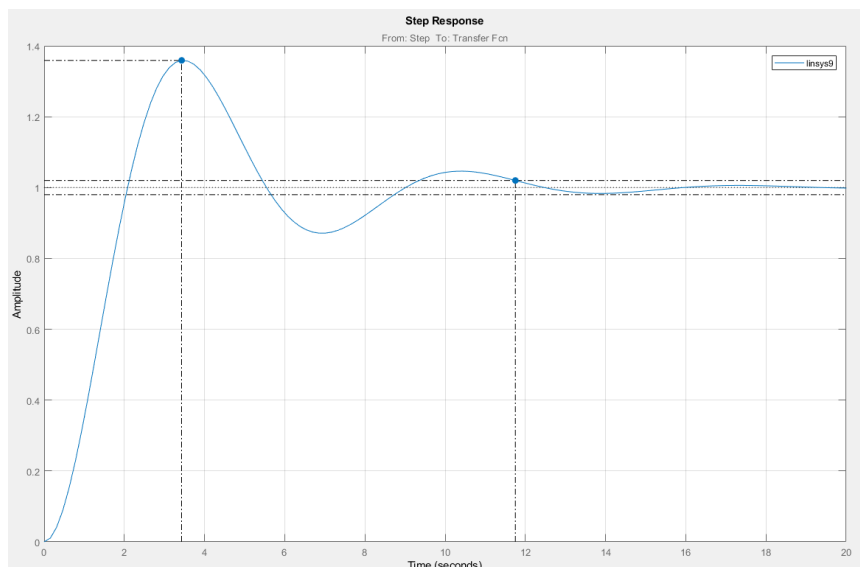


Рис. 35 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=1.1$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.36, перерегулювання складає 35.9% на 3.43 с. Час встановлення робочого режиму становить 11.8 с.

8) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=1.5$

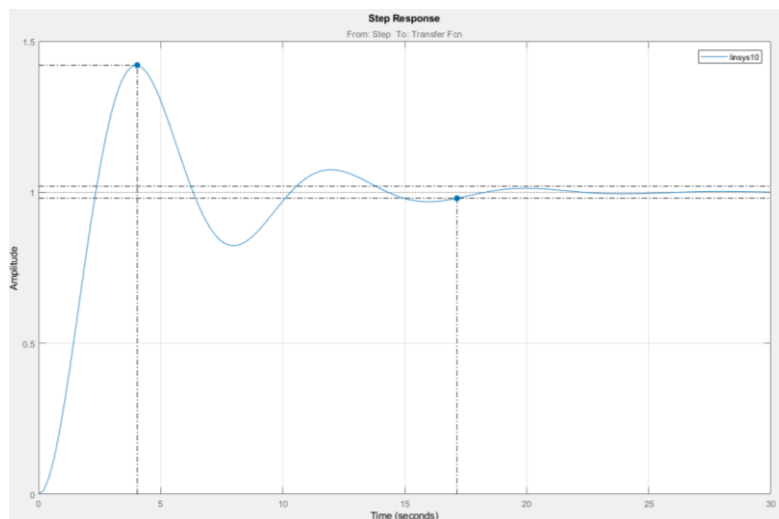


Рис. 36 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=1.5$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.42, перерегулювання складає 42.1% на 4.04 с. Час встановлення робочого режиму становить 17.1 с.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

9) Аналіз із коефіцієнтом $a_1=2$

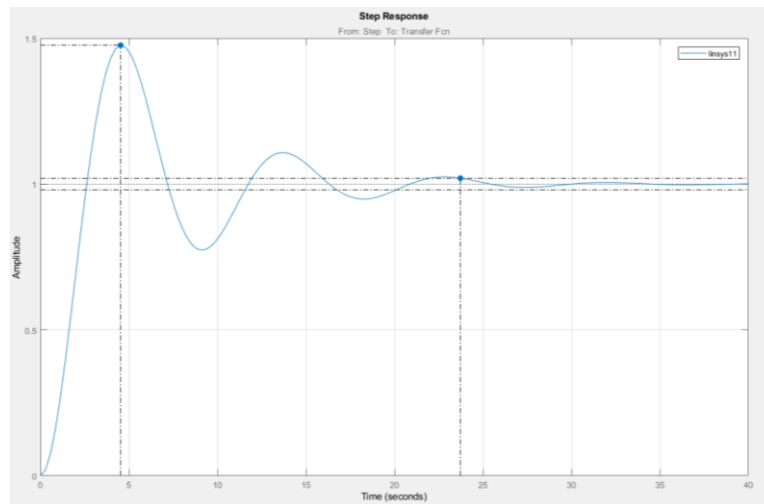


Рис. 37 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=2$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.48, перегулювання складає 47.6% на 4.53 с. Час встановлення робочого режиму становить 23.7 с.

На рис.10 – рис.13 наведено порівняльний графік двох характеристик – початкової та кінцевої.

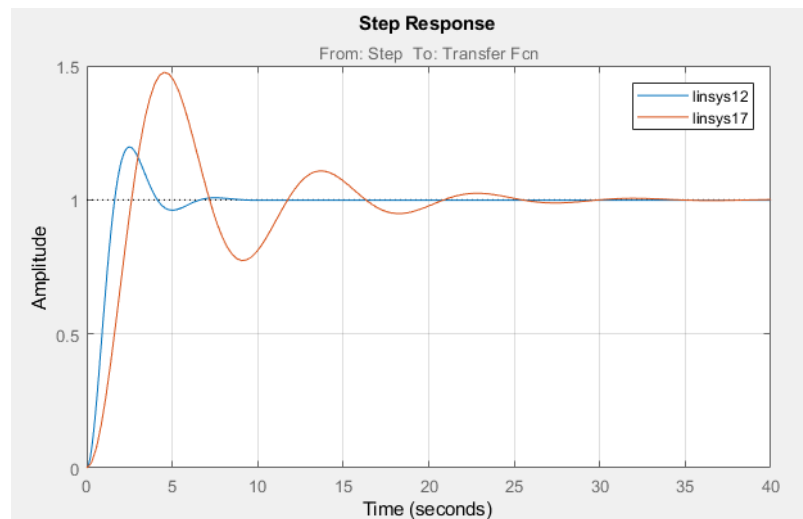


Рис. 38 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.5$ і $a_1=2$

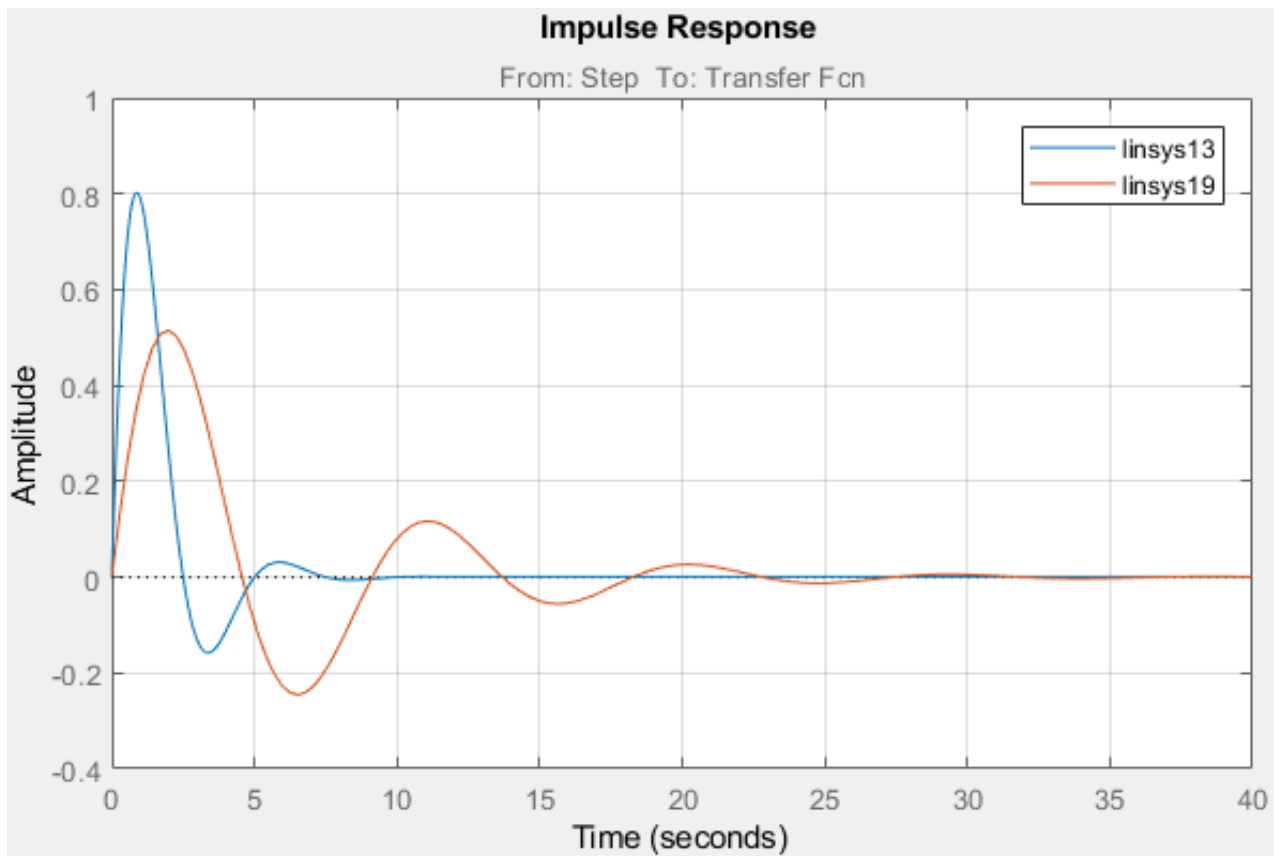


Рис. 39 Порівняльна імпульсна характеристика при коефіцієнті $a_1=0.5$ і $a_1=2$

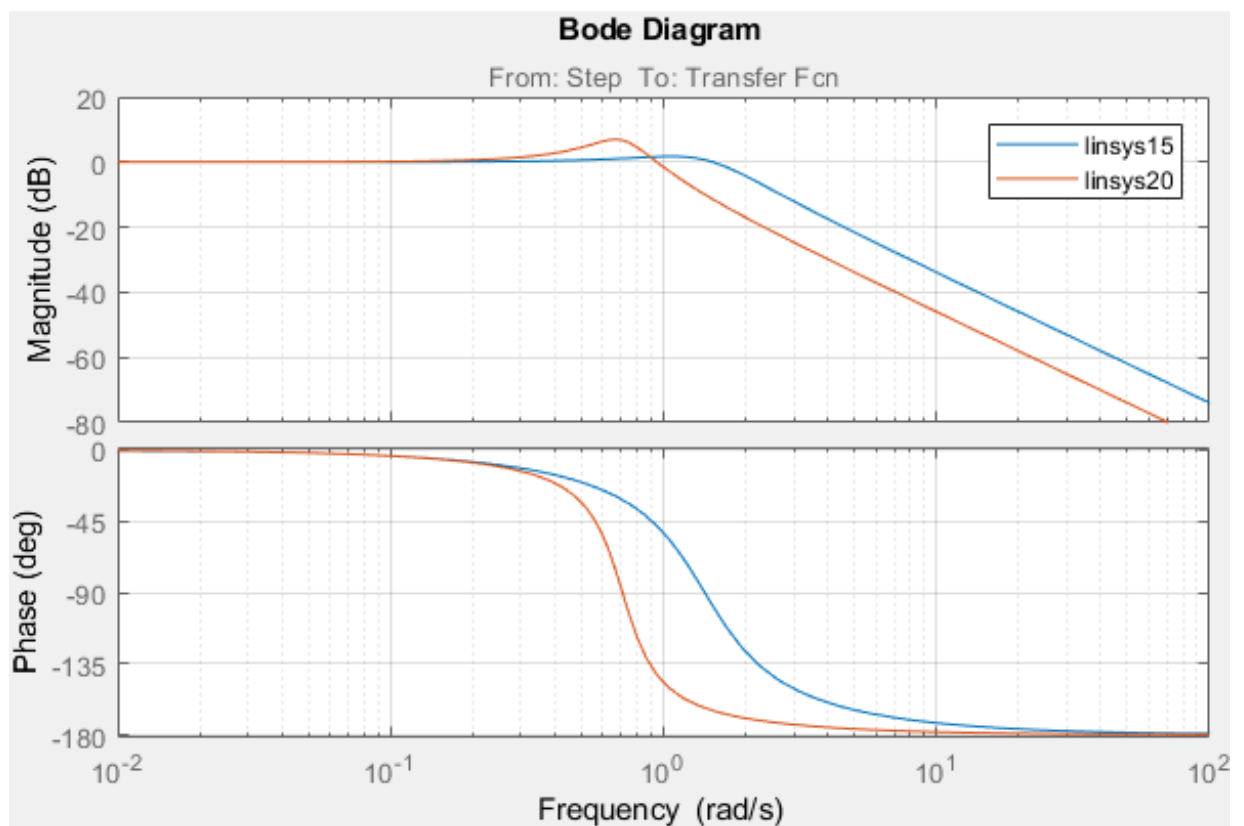


Рис. 40 Порівняльні ЛАЧ і ЛФЧ характеристики при коефіцієнті $a_1=0.5$ і $a_1=2$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

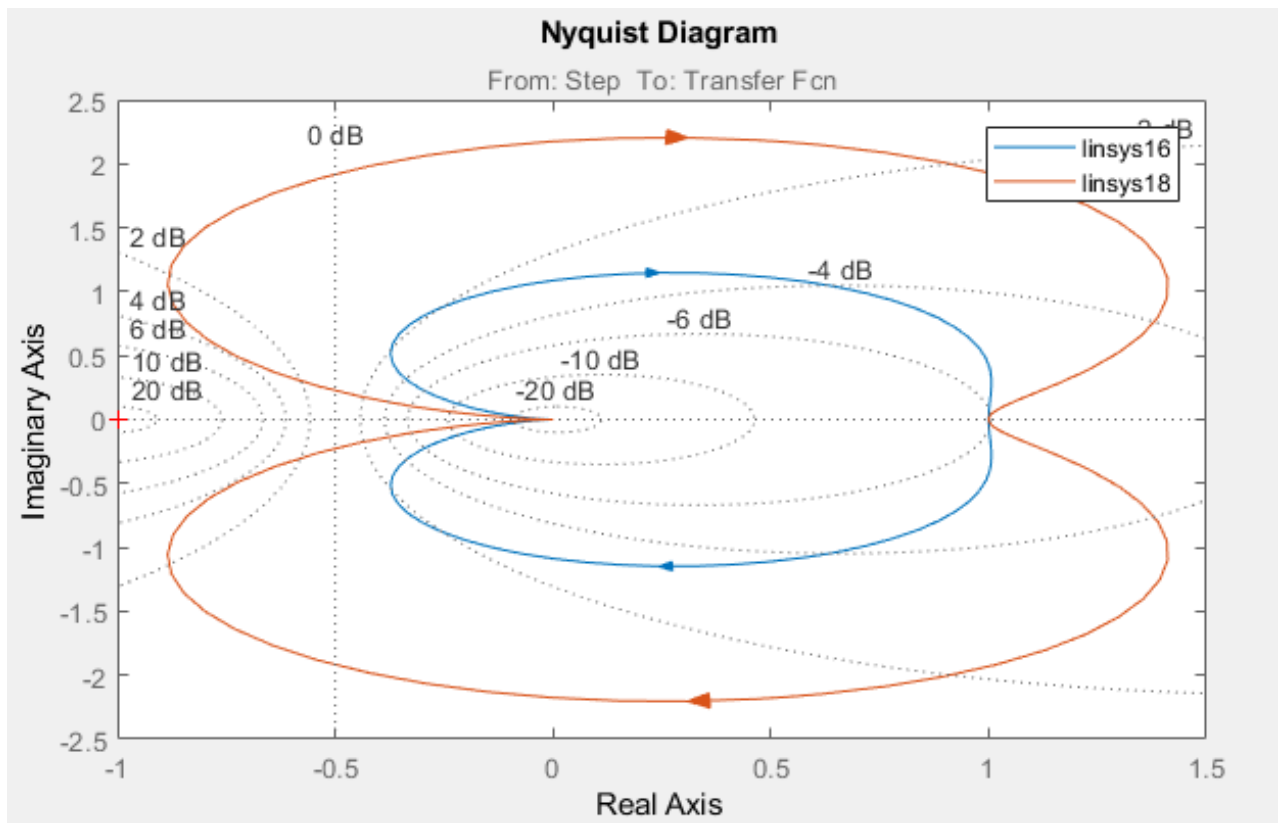


Рис. 41 Порівняльний годограф Найквіста при коефіцієнті $a_1=0.5$ і $a_1=2$

Висновки:

В результаті моделювання системи при різних значеннях коефіцієнта a_1 можна зробити висновок, що даний коефіцієнт впливає на величину амплітуди, збільшуючи її, та відповідно – час перехідного процесу. Із ростом даного коефіцієнта знижується чутливість та стабільність системи, зменшується полоса пропускання і відповідно збільшується величина полоси загородження.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

МД ПІ71мп.00.012. ПЗ

Лист

50

Наступний аналіз проведено зі зміною коефіцієнта $a_2=0,5...0,8$;

1) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.5$

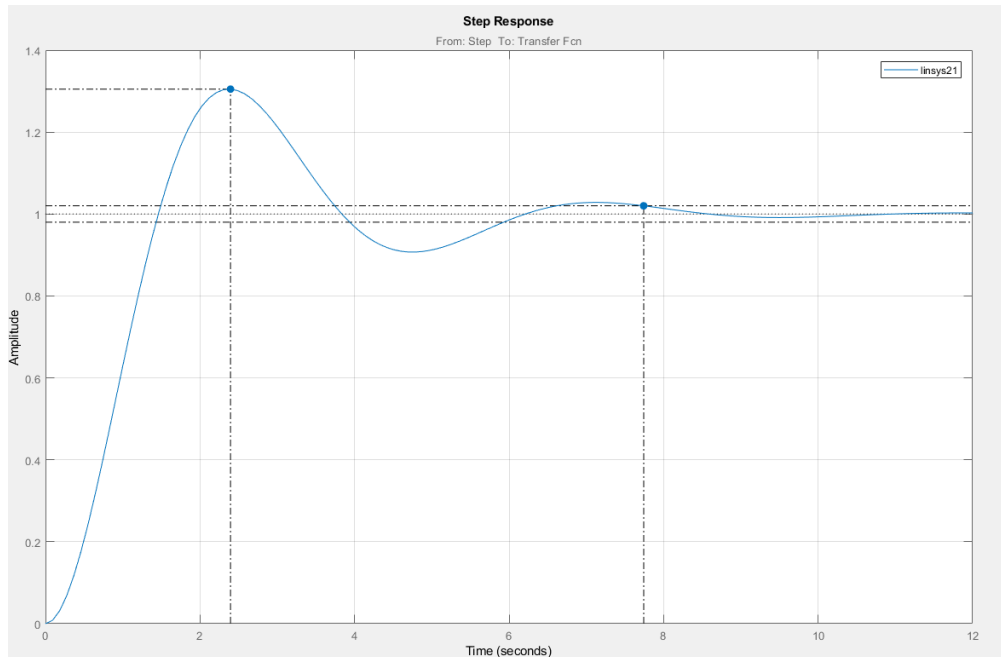


Рис. 42 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,5$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.3, перерегулювання складає 30.5% на 2.39 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.74 с.

2) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.55$

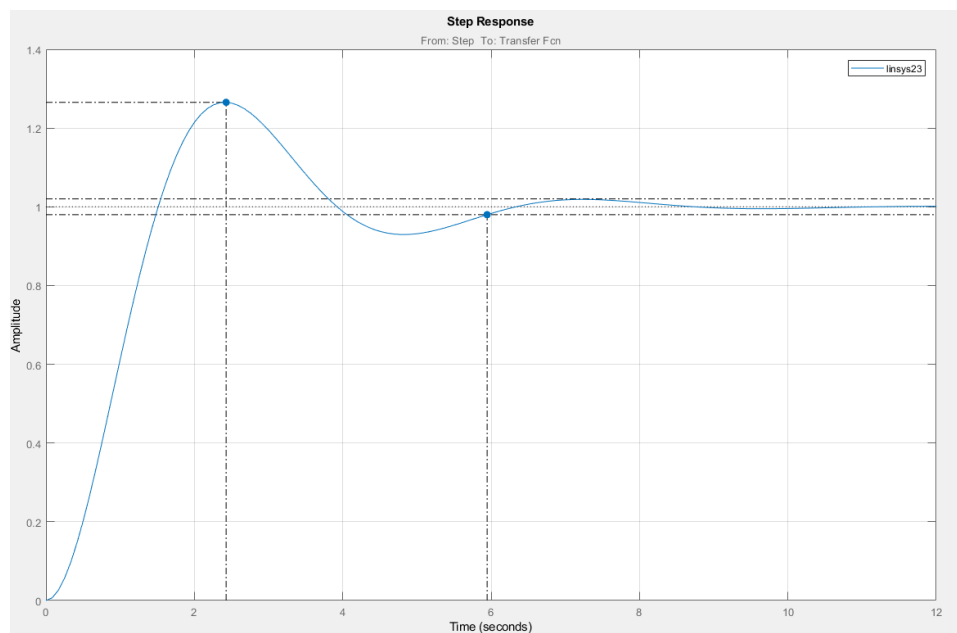


Рис. 43 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,55$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

МД ПІ71мп.00.012. ПЗ

Лист

51

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.27, перерегулювання складає 26.5% на 2.43 с. Час встановлення робочого режиму становить 5.95 с.

3) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.6$

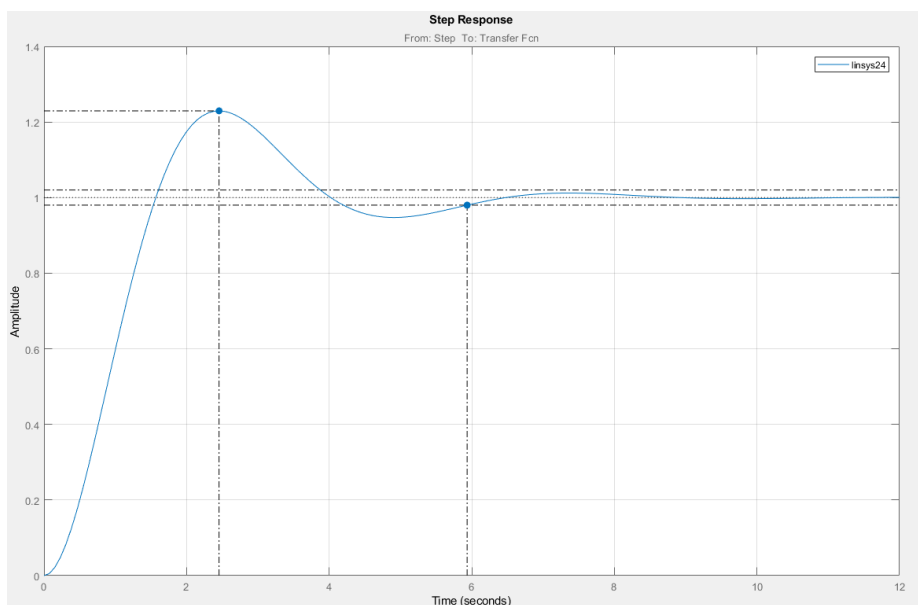


Рис. 44 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,6$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.23, перерегулювання складає 22.9% на 2.46 с. Час встановлення робочого режиму становить 5.94 с.

4) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.65$

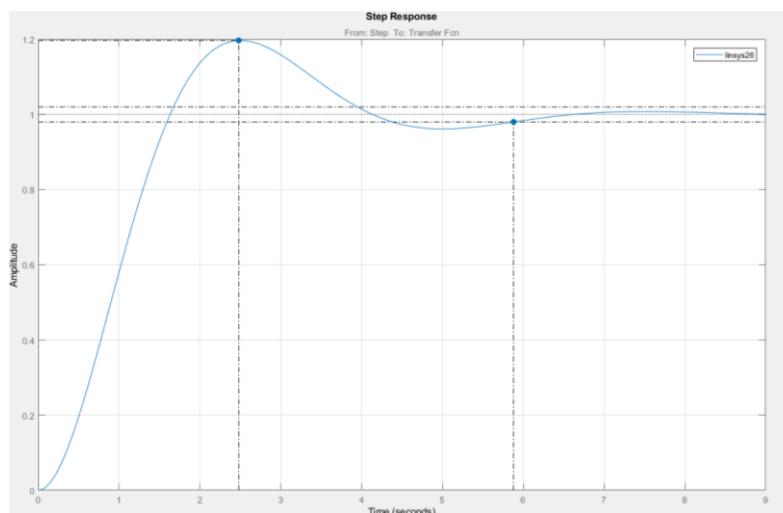


Рис. 45 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,65$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.2, перерегулювання складає 19.7% на 2.48 с. Час встановлення робочого режиму становить 5.88 с.

5) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.7$

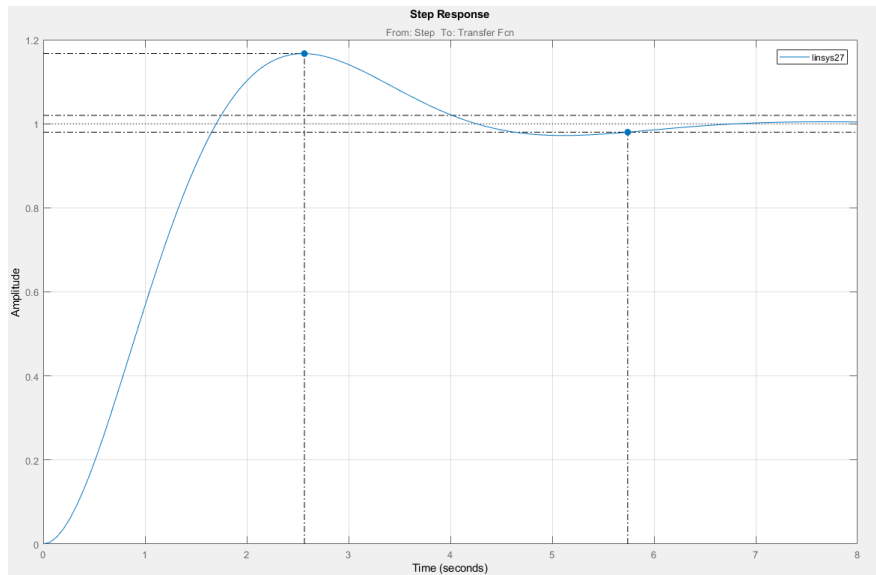


Рис. 46 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,7$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.17, перерегулювання складає 16.7% на 2.57 с. Час встановлення робочого режиму становить 5.74 с.

б) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.75$

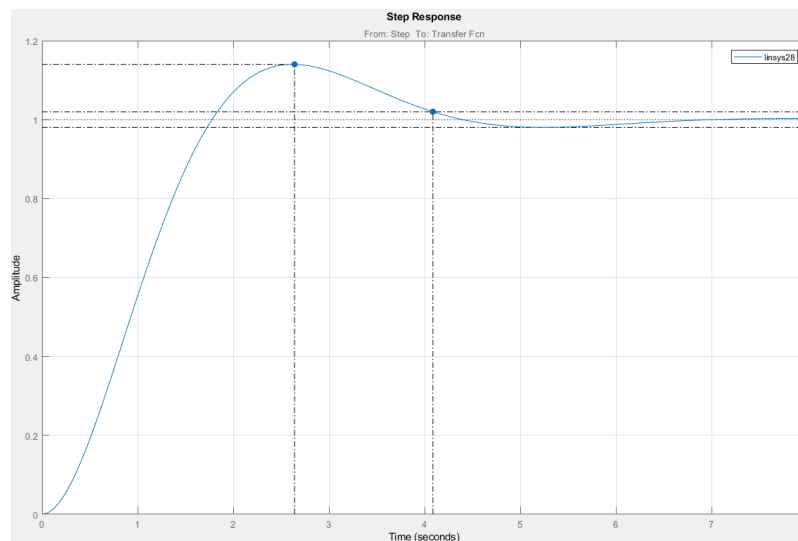


Рис.47 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,75$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.14, перерегулювання складає 14% на 2.64 с. Час встановлення робочого режиму становить 5 с.

7) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_2=0.8$

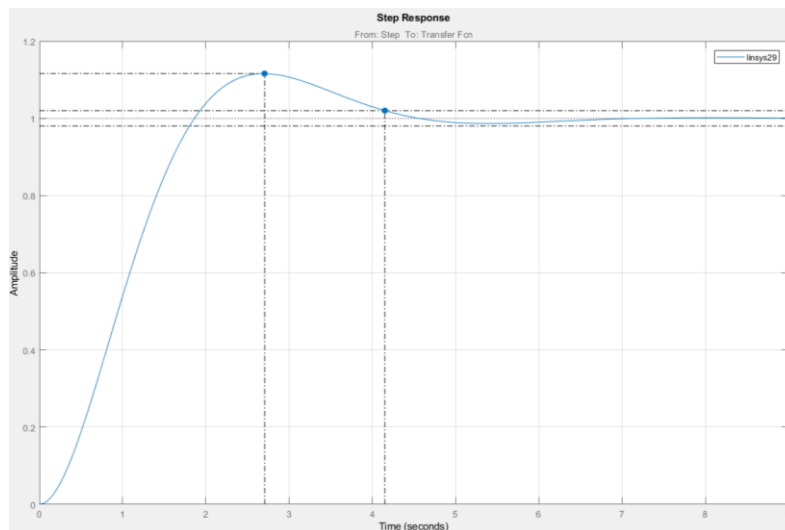


Рис. 48 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,8$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.12, перерегулювання складає 11.6% на 2.71 с. Час встановлення робочого режиму становить 4.15 с.

На рис. 10 – рис. 13 представлено характеристики системи при мінімальному та максимальному значенні коефіцієнта a_2 .

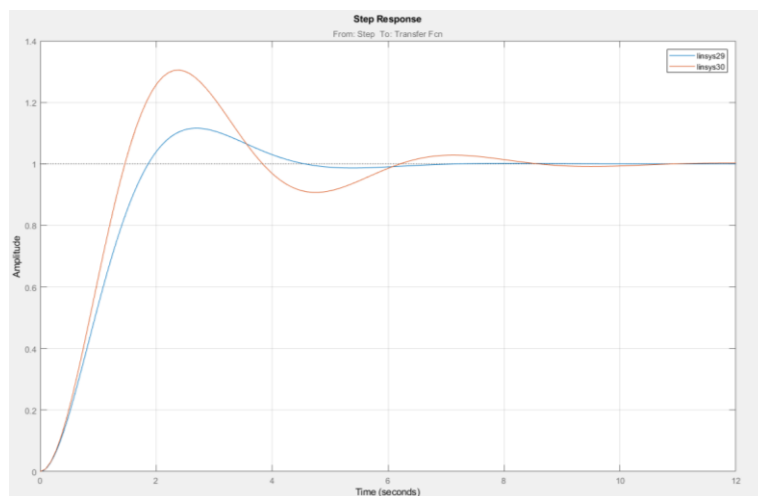


Рис. 49 Порівняльна перехідна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,5...0,8$

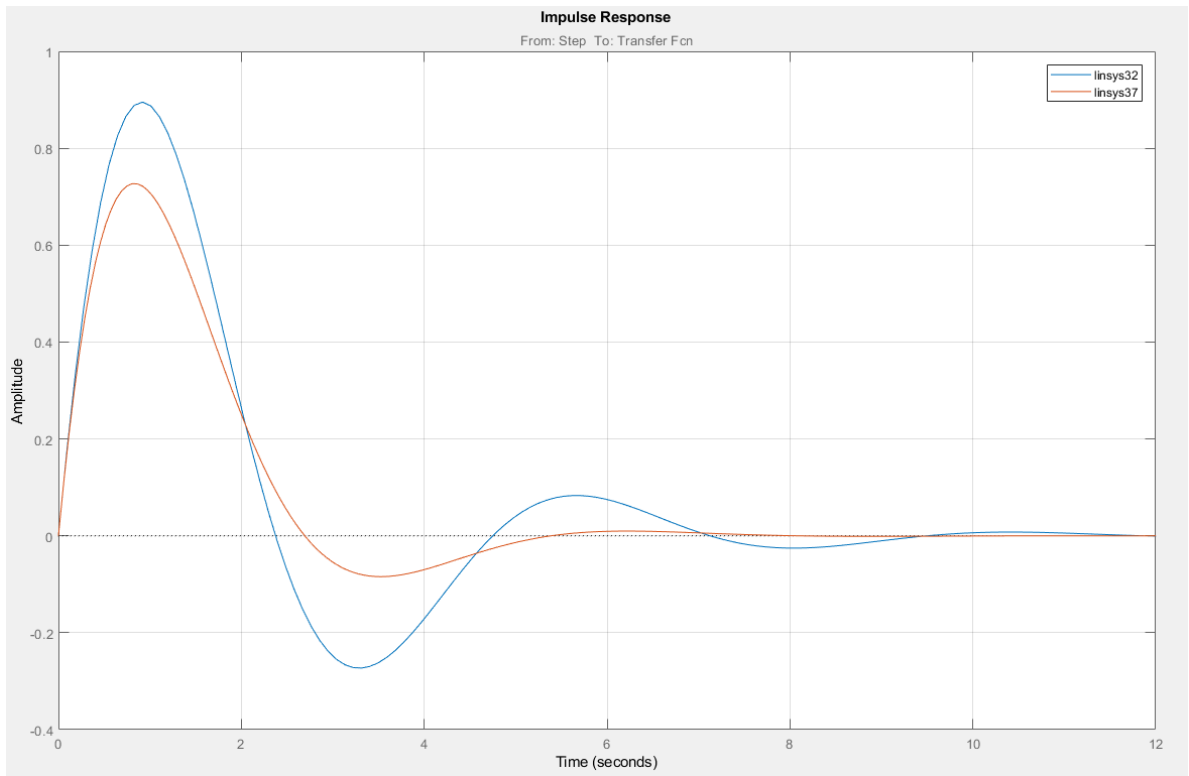


Рис.50 Порівняльна імпульсна характеристика при коефіцієнті $a_2=0,5...0,8$

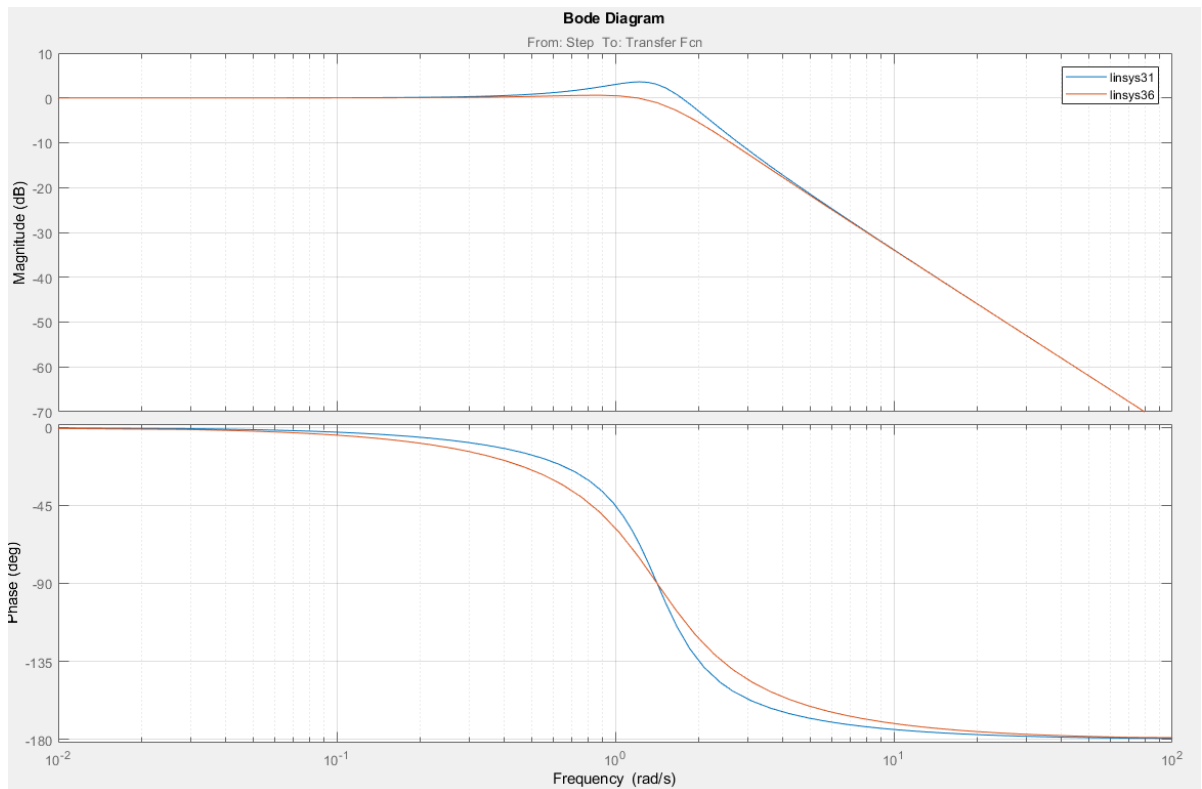


Рис.51 Порівняльна ЛАЧ і ЛФЧ характеристика при коефіцієнті $a_2=0,5...0,8$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

МД ПІ71мп.00.012. ПЗ

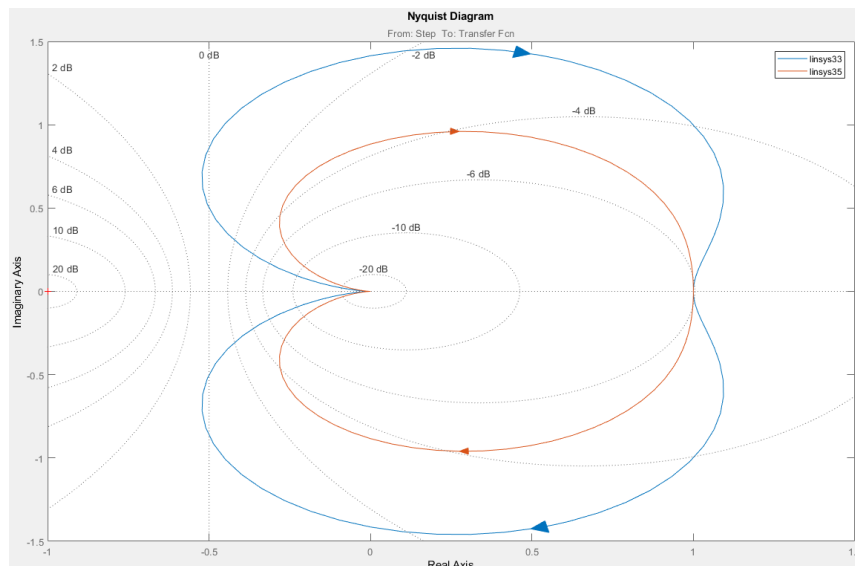


Рис.52 Порівняльна характеристика годографів Найквіста при коефіцієнті $a_2=0,5...0,8$

Висновки

Збільшення значення другого коефіцієнта призводить до поліпшення метрологічних характеристик ваговиміральної системи, зокрема, збільшення фактору її стійкості, зменшення часу перерегулювання, часу перехідного процесу та часу встановлення робочого режиму.

Наступний аналіз проведено зі зміною коефіцієнта $a_3=0,3...1$;

1) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0,3$

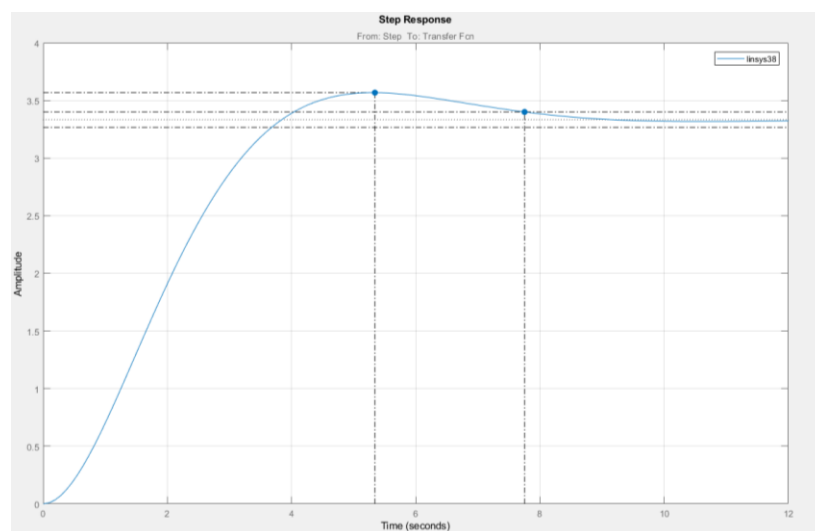


Рис. 53 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,3$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 3.57, перерегулювання складає 7.03% на 5.34 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.75 с.

2) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.4$

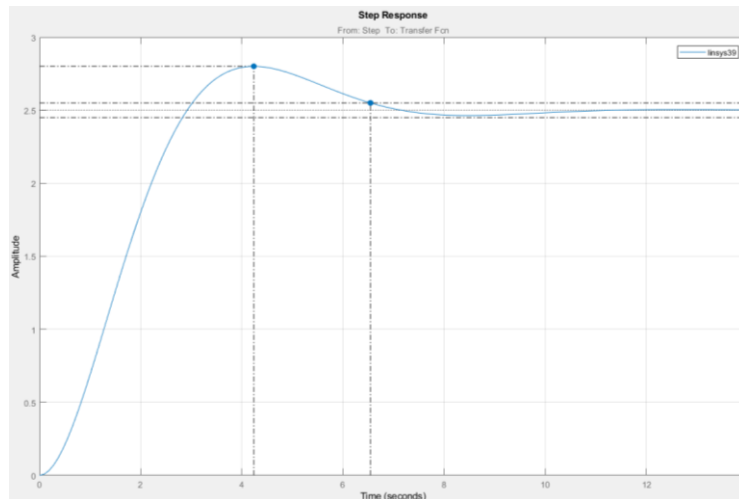


Рис. 54 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,4$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 2.8, перерегулювання складає 12% на 4.24 с. Час встановлення робочого режиму становить 6.54 с.

3) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.5$

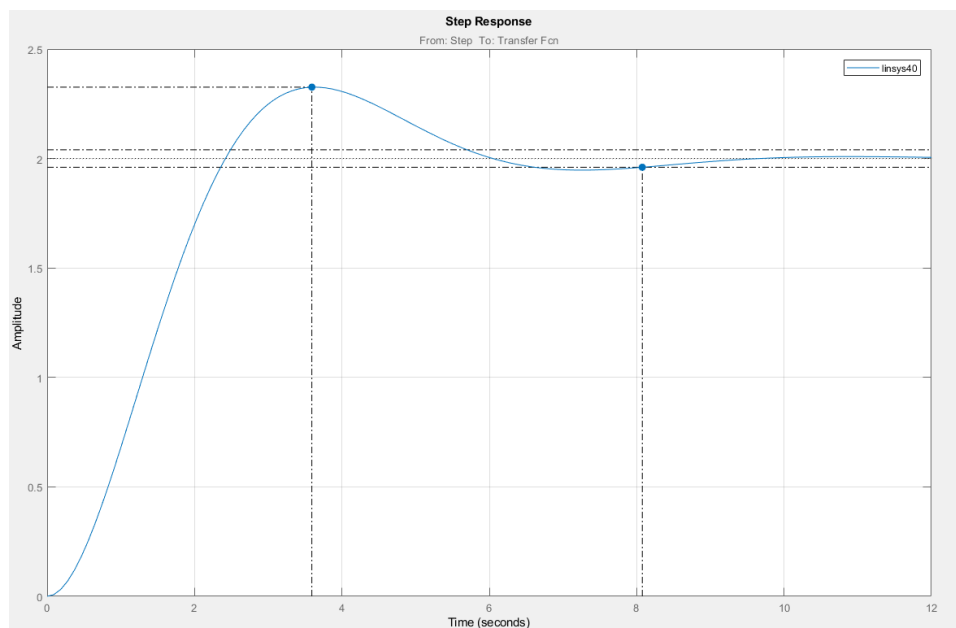


Рис. 55 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,5$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 2.33, перерегулювання складає 16.3% на 3.59 с. Час встановлення робочого режиму становить 8.08 с.

4) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.6$

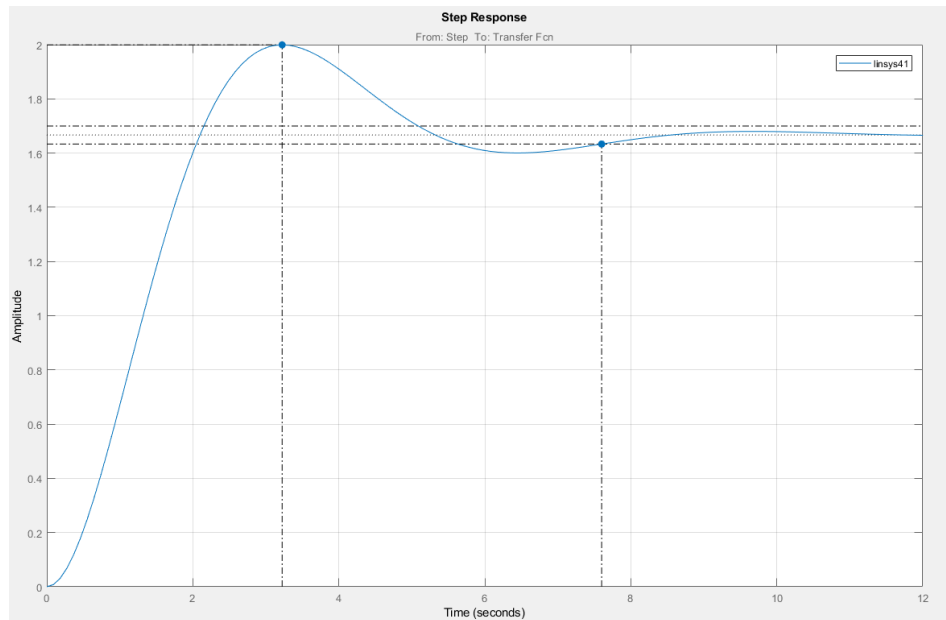


Рис. 56 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,6$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 2, перерегулювання складає 20% на 3.22 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.6 с.

5) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.7$

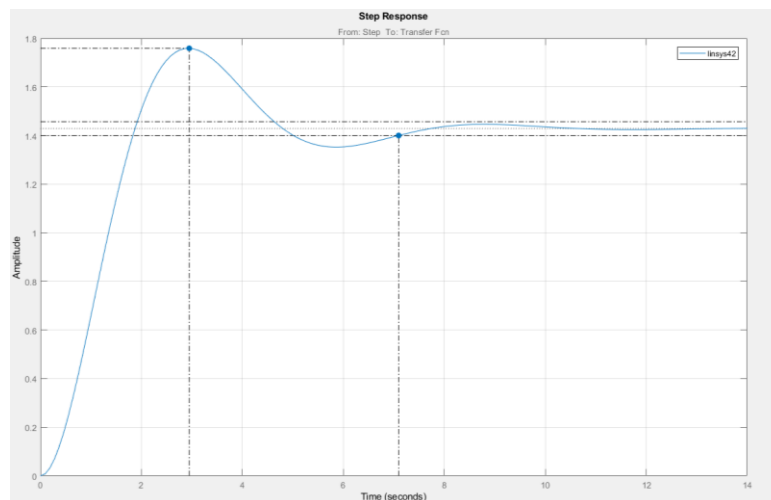


Рис. 57 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,7$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.76, перерегулювання складає 23.1% на 2.95 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.1 с.

б) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.8$

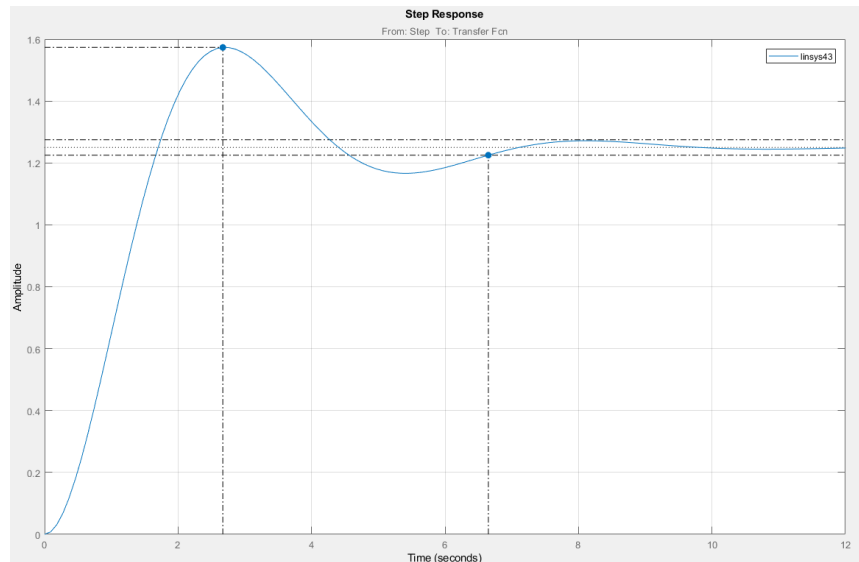


Рис. 58 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,8$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.57, перерегулювання складає 25.9% на 2.67 с. Час встановлення робочого режиму становить 6.65 с.

7) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=0.9$

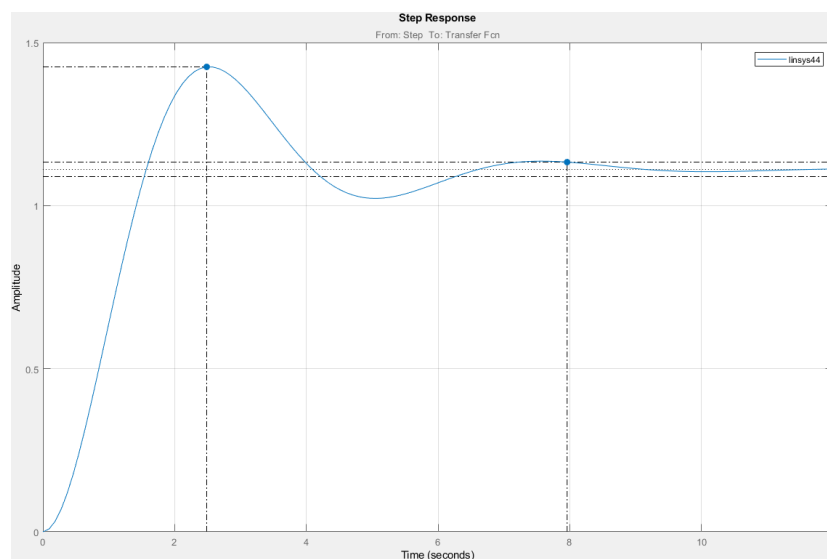


Рис. 59 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=0,9$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.43, перерегулювання складає 28.3% на 2.49 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.96 с.

8) Аналіз характеристик системи із коефіцієнтом $a_3=1$

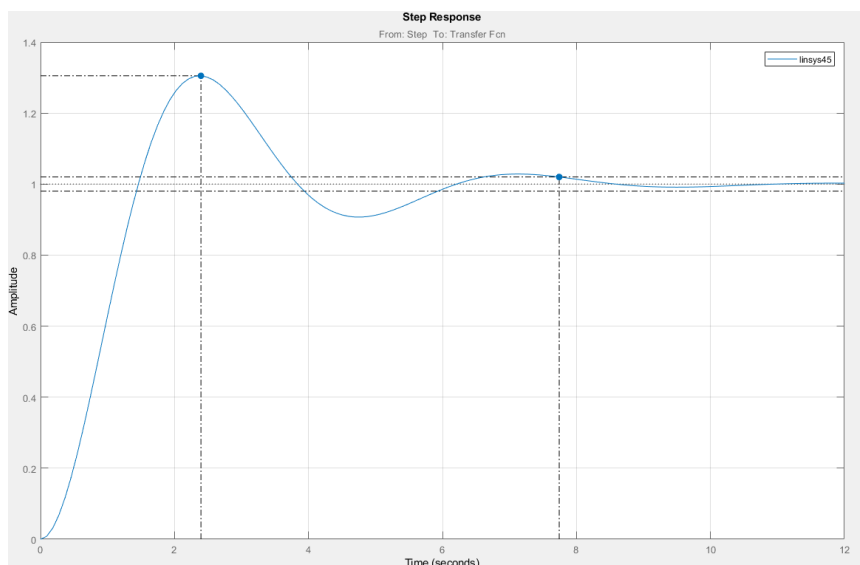


Рис. 60 Перехідна характеристика при коефіцієнті $a_3=1$

В даному випадку значення максимальної амплітуди рівне 1.3, перерегулювання складає 30.5% на 2.39 с. Час встановлення робочого режиму становить 7.74 с.

2.2 Аналіз методів компенсації температурної похибки

Способи температурної компенсації, які існують на сьогоднішній день, можна застосувати для дуже вузького проміжку температур, який не перевищує 100°C , т. я. в цьому діапазоні залежність опору тензорезистивного елемента та температурних варіацій вважають лінійною. Для кремнієвих резисторів в діапазоні температур до 300°C залежність опору від температури характеризується істотною нелінійністю. Тому є потреба впроваджувати нові інженерні рішення для компенсації температурного впливу.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		60

Високотемпературні ТП навантаження потребують складного обладнання для створення профільованих тривимірних структурних елементів, що базуються на основі технології «кремній на ізоляторі».

Для термокомпенсації використовують наступні методи, які ґрунтуються на структурних методах підвищення характеристик точності:

- схемна компенсація температурного збільшення опору резисторів;
- застосування комбінованих тензорезисторів;
- застосування тензорезисторів з компенсаційною петлею;
- внесення поправки.

Перший спосіб ґрунтується на інтеграції компенсаційних тензорезисторів у мостову вимірювальну схему, що знаходяться в однакових температурних умовах з активними. За умови використання повної мостової схеми Уінстона, в якій всі тензорезистори компенсують один одного та паралельно вимірюють деформацію, відбувається взаємокомпенсація температурних варіацій опорів тензорезисторів. Таким чином температурна похибка мостової схеми практично виключається за умови використання даного методу компенсації температурної похибки. Залишкову похибку, яка виникає через варіативність температурних характеристик тензорезисторів можна мінімізувати методом підбору тензорезисторів з максимально близькими температурними характеристиками.

Менш популярні способи температурної компенсації, засновані на застосуванні комбінованих типів тензорезисторів, тензорешітка яких виконана з двох матеріалів, що мають рівні за величиною, але різні за знаком ТКО, і тензорезисторів з компенсаційною петлею, яка має ТКО більший, ніж у самого тензорезистора, та інтегрується у якості додаткового опору в компенсаційне плече мостової схеми.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		61

Впровадження вищезазначених методів компенсації температурної похибки тензорезистивних ВП дозволяє мінімізувати температурну похибку мостової схеми. Метод інтеграції поправки у результат вимірювального процесу дозволяє компенсувати усі складові температурної похибки. Значення температури тензодатчика вимірюється за допомогою додаткового вимірювального каналу. За попередньо визначеною певною залежністю температурної похибки від значення вихідного сигналу каналу вимірювання температури вноситься поправка в виміряне значення. До появи інтелектуальних тензорезисторних ЗВТ поправка вносилася в аналоговому вигляді за допомогою спеціальних функціональних перетворювачів. Застосування в сучасних тензорезисторних ЗВТ інтелектуальних функціональних вузлів дозволяє автоматизувати процес внесення поправки і реалізувати досить складні алгоритми компенсації температурної похибки.

Тому доцільно розглянути можливість застосування традиційних методів температурної компенсації для тензорезистивних датчиків з нелінійними температурними залежностями опору. Існуючі способи термокомпенсації із застосуванням терморезистора вимагають додаткового налаштування після виготовлення чутливого елемента, яке заключається у розрахунку підлаштовуваного резистора за результатами вимірювань опорів тензорезисторів і визначення їх температурних характеристик. З цієї причини доцільно визначення граничних значень температурних похибок чутливості при використанні в якості терморезистора напівпровідникового резистора, що має характеристики такі ж, як у тензорезисторів, і виготовляється в єдиному технологічному процесі з ними. Тензорезистори в складі ЧЕ об'єднані в мостову вимірювальну схему (рис. 10).

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

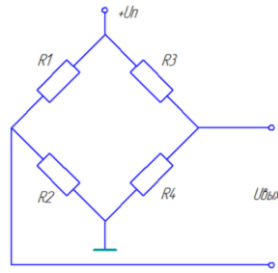


Рис. 10 Мостова вимірювальна схема

Залежність вихідного сигналу мостової схеми можна описати наведеним нижче виразом:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{п}} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

У реальних умовах тензорезистори володіють різним набором параметрів через інструментальні похибки при виготовленні. Варіативність параметрів призводить до різних температурних характеристик тензорезисторів, що негативним чином впливає на величину температурної похибки чутливості. Нелінійність температурної залежності напівпровідникових тензорезисторів призводить до необхідності використання для її опису нелінійної функції:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2)$$

де R_0 – номінал тензорезистора при нормальній температурі; α_1 – ТКС 1-го порядку [$1 / ^\circ \text{C}$]; α_2 – ТКС 2-го порядку [$1 / ^\circ \text{C}^2$].

Залежність опору тензорезистора від деформації під впливом вимірюваного тиску виражається наступною формулою:

$$R(P) = R_0(1 + k\varepsilon)$$

де k – коефіцієнт тензочутливості; ε – відносна деформація тензорезистора. Коефіцієнт тензочутливості можна представити таким, що лінійно залежить від температури:

$$k(T) = k_0(1 + \gamma \Delta T)$$

де γ – ТКЧ. Підставивши вирази в цю формулу, отримаємо залежність опору тензорезистора від температури і деформації внаслідок вимірюваного тиску:

$$R(P, T) = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2)(1 \pm k_0(1 + \gamma\Delta T)\epsilon)$$

де знак «+» відповідає тензорезисторами R₁ і R₄, а знак «-» –тензорезисторами R₂ і R₃. Температурні залежності опорів тензорезисторів з урахуванням розкиду параметрів наведені на рис.15. Тензорезистори характеризуються позитивним ТКС.

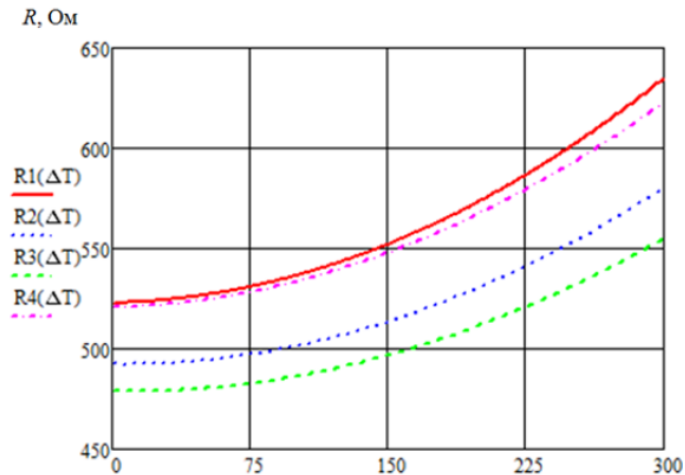


Рис.11 Температурні залежності опорів тензорезисторів

У програмі MathCAD було проведено моделювання мостової схеми, тензорезистори якої мають номінальний опір 500 Ом і характеризуються розкидом параметрів, показаним на рис. 11. Температурні залежності опорів тензорезисторів були апроксимовані.

Вихідний сигнал мостової вимірювальної схеми при максимальному тиску і зміні температури до 300 ° С представлений на рис. 12.

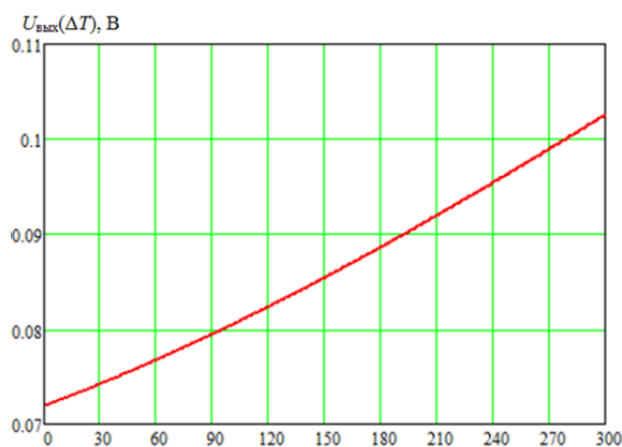


Рис.12 Вихідний сигнал мостової вимірювальної схеми

З рис. 12 видно, що при збільшенні температури вихідний сигнал мостової схеми нелінійно зростає від 72 до 103 мВ, що становить похибка 42,6%, або 0,142% / ° С. З рис. 12 випливає необхідність прийняття спеціальних заходів для температурної компенсації чутливості мостової схеми.

Найбільш простим способом температурної компенсації є послідовне включення терморезистора в ланцюг живлення мостової схеми (Рис. 13).

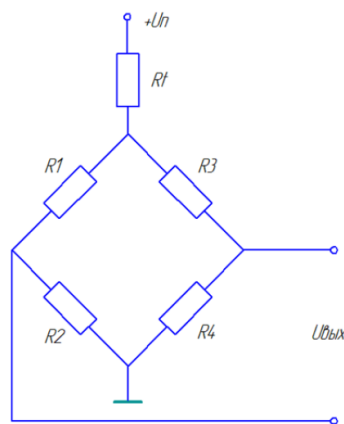


Рис. 13. Включення терморезистора в мостову схему для компенсації температурної похибки чутливості

Цікавим є використання в якості термозалежного резистора опору, що виконується за тим же технологічним процесом, що і тензорезистори, і має аналогічну температурну характеристику і номінал, що дозволило б виготовляти терморезистор в одній технологічній операції з виготовленням тензорезисторів, розмістивши його на мембрані ЧЕ в області, що не піддається деформації під дією вимірюваного тиску (рис. 18).

У цьому випадку частина схеми, що містить джерело живлення $U_{п}$ і терморезистор R_t , можна представити у вигляді еквівалентного генератора напруги, керованого температурою, напруга на виході якого $U_{п1}$ буде визначатися формулою

$$U_{п1} = U_{п} \frac{R_M}{R_M + R_T}$$

де R_M - опір мостової схеми, що визначається за виразом:

$$R_M = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

R_t - опір терморезистора, залежність якого від температури також доцільно описати поліномом 2-го порядку:

$$R_t(T) = R_{t0}(1 + \beta_1 \Delta T + \beta_2 \Delta T^2)$$

де β_1 і β_2 - ТКС терморезистора 1-го і 2-го порядків відповідно.

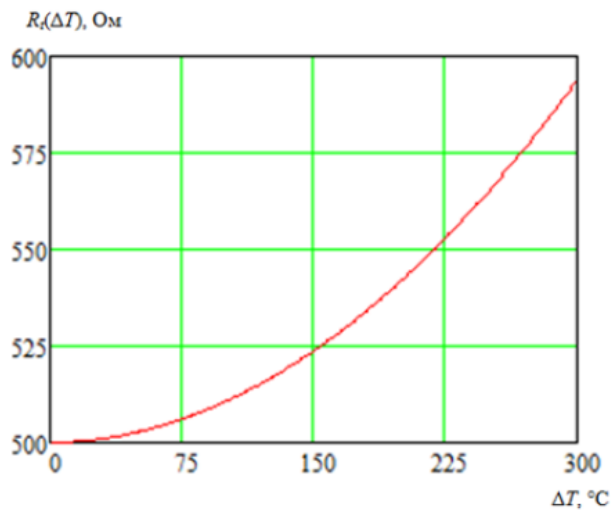


Рис. 14. Температурна залежність опору терморезистора

Результати моделювання схеми з терморезистором показані на рис. 19.

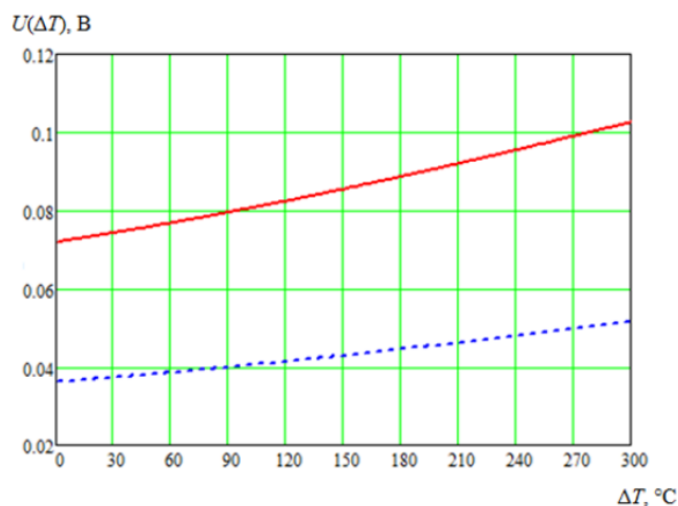


Рис. 15. Результати моделювання вихідного сигналу при максимальному тиску схеми без температурної компенсації (суцільна лінія) і схеми з температурною компенсацією (пунктир)

З аналізу результатів моделювання випливає, що використання терморезистора, що володіє характеристикою, показаною на рис. 15, знижує вдвічі вихідний сигнал вимірювальної мостової схеми, при цьому нахил лінії залишається практично незмінним, тобто температурна похибка вихідного сигналу практично не знижується. Таким чином, виникає задача визначення температурної характеристики опору компенсуючого терморезистора, тобто визначення коефіцієнтів β_1 і β_2 , що входять у вираз (10). Рішення даного завдання аналітично може бути отримано з використанням символічних обчислень в програмі MathCAD. Постановка завдання визначення температурної залежності терморезистора виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial(\Delta T)} (U_{\text{вих}}(\Delta T)) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (U_{\text{вих}}(\Delta T)) = 0; \end{cases}$$

Перше рівняння системи відображає умову мінімальної температурної чутливості вихідного сигналу термокомпенсованої схеми, друге рівняння відображає умова незмінності чутливості схеми до деформації, викликаній вимірюваним тиском, при зміні температури.

Рішення системи щодо β_1 і β_2 дає такі вирази:

$$\beta_1 = \frac{R_0(\gamma - \gamma\alpha_2\Delta T^2) + Rt_0(\gamma + \alpha_1 - \gamma\alpha_2\Delta T^2)}{Rt_0}$$

$$\beta_2 = \frac{R_0(\gamma\alpha_1 - 2\gamma\Delta T) + Rt_0(\alpha_2 + \gamma\alpha_1 - 2\gamma\alpha_2\Delta T)}{Rt_0}$$

де α_1 і α_2 – усереднені значення ТКС тензорезисторів мостової схеми; R_0 – усереднений номінал тензорезисторів; R_{t_0} - номінал терморезистора. Аналіз виразів показує, що ТКС терморезистора залежать від температури, однак залежність опору терморезистора від температури близька до лінійної (рис. 20).

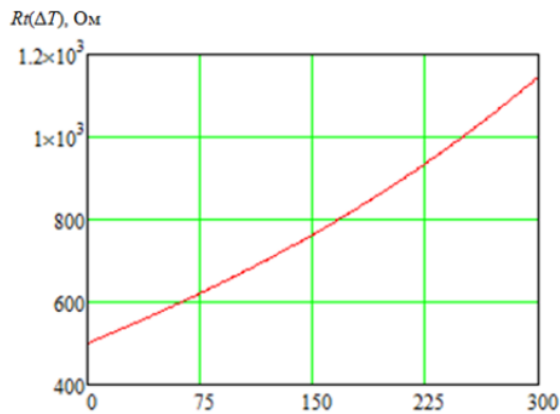


Рис. 16. Залежність опору терморезистора від температури з урахуванням визначених значень ТКС

Залежність на рис. 16 з достатньою для практики точністю можна апроксимувати прямою, при цьому значення β_2 дорівнюватиме 0, а β_1 легко визначиться аналітично. Таким чином, температурна залежність опору терморезистора буде лінійною. Номінал терморезистора доцільно вибирати близько 0,1 від номіналу тензорезисторів, щоб не відбулося значного зниження вихідного сигналу мостової схеми. Так, для схеми, параметри якої наведено в табл. 1, при виборі номіналу терморезистора, рівного 50 Ом, значення ТКС β_1 склало $0,024 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. На рис. 21 приведена залежність вихідного сигналу мостової схеми від температури, отримана з урахуванням вищенаведених значень.

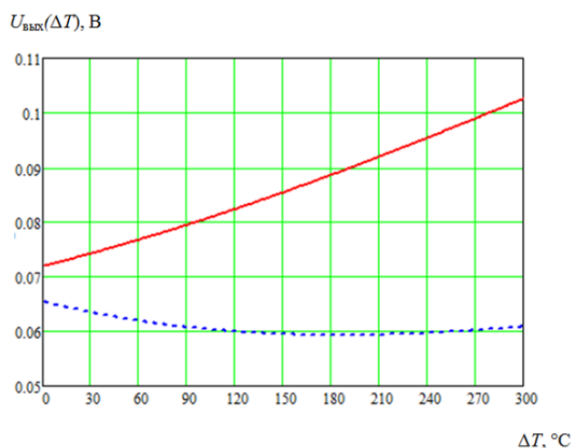


Рис. 17. Результати моделювання вихідного сигналу при максимальному тиску схеми без температурної компенсації (суцільна лінія) і схеми з

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

температурною компенсацією (пунктир) з урахуванням знайдених значень
ТКС і номіналу терморезистора

Для компенсації температурної складової використовують два тензочуттєві елемента, розташованих на загальній підкладці перпендикулярно один одному (рис. 18). При цьому температурні подовження обох елементів однакові, а подовження внаслідок впливу деформуючої сили будуть різні.

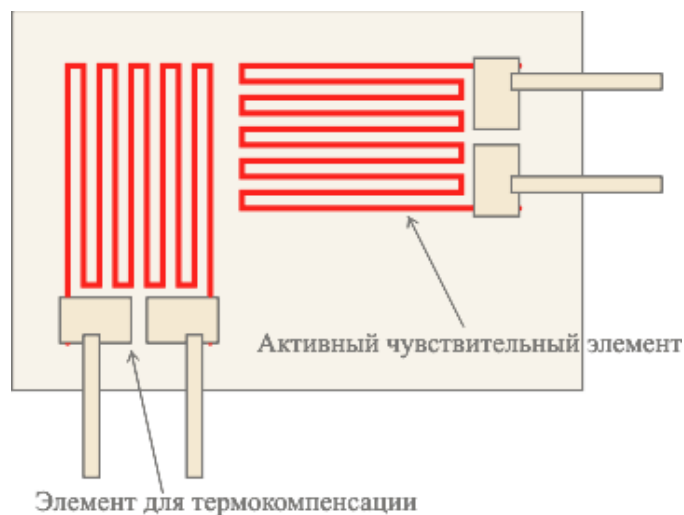
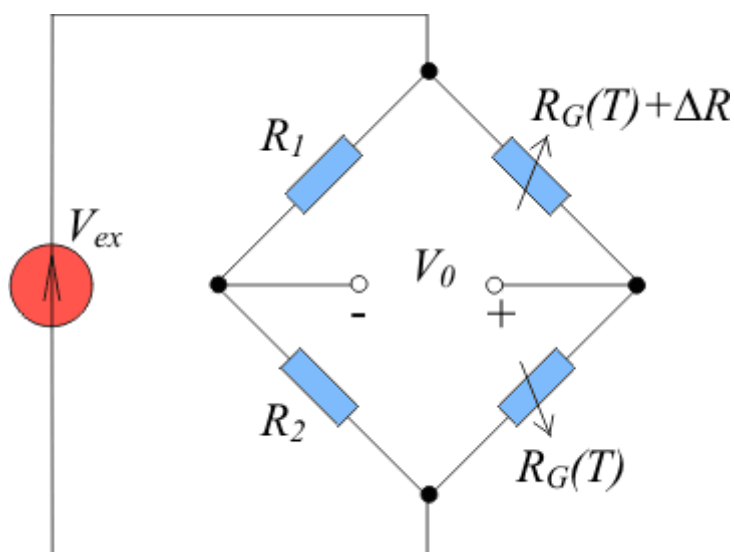


Рис. 18 Розташування тензорезисторів для компенсації температурної похибки

Використовуючи ці елементи в різних плечах вимірювального моста (рис. 19), можна частково компенсувати температурну похибку.



Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Рис. 19 Напівмостова схема включення тензорезисторів для компенсації температурної похибки

Компенсація температурної похибки, яка виконується виробником тензодатчиків, зазвичай не дозволяє отримати помилку менше 10 мікрострейн на градус. Однак, використовуючи поліноміальні апроксимації температурної залежності опору для її програмної компенсації, можна знизити температурну похибку до 1 мікрострейна на градус.

У напівмостовій схемі можна використовувати також два тензодатчика з некомпенсованою температурною похибкою, якщо один з них працює на розтяг, другий - на стиск, наприклад, якщо вимірюється механічне напруження вигину балки. Таким чином можна підвищити чутливість схеми вимірювання в 2 рази і одночасно компенсувати температурну похибку (рис. 20).

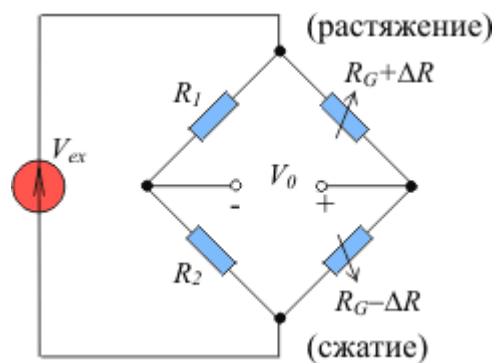
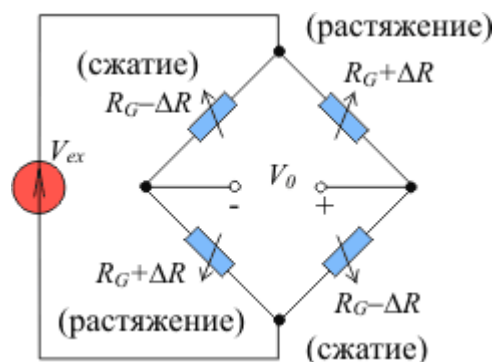


Рис. 20 Включення двох датчиків для компенсації температурної похибки

Подальшого підвищення чутливості схеми вимірювань можна досягти, якщо використовувати чотири тензодатчика, два з яких працюють на розтягнення, і два - на стиск (рис. 21).



Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Рис. 21 Використання чотирьох тензодатчиків для підвищення чутливості схеми вимірювання та компенсації температурної похибки;

Основними схемами включення тензометричних датчиків тиску, що застосовуються в даний час, є мостові схеми. Представлені схеми можуть бути виконані як на змінному, так і на постійному струмі.

Для проведення вимірювань в одне або кілька плечей моста включаються резистивні вимірювальні перетворювачі. При зміні опорів тензорезисторів змінюється напруга у вимірювальній діагоналі моста. Ця напруга є вихідним сигналом моста. Чутливість мостової схеми визначається як відношення максимально очікуваної зміни вихідної напруги V_0 до напруги живлення (збудження) моста V_B :

$$S = \frac{V_{0max}}{V_B}$$

На практиці застосовуються різні конфігурації мостових схем. На рис. 22. наведені різні схеми включення мостів.

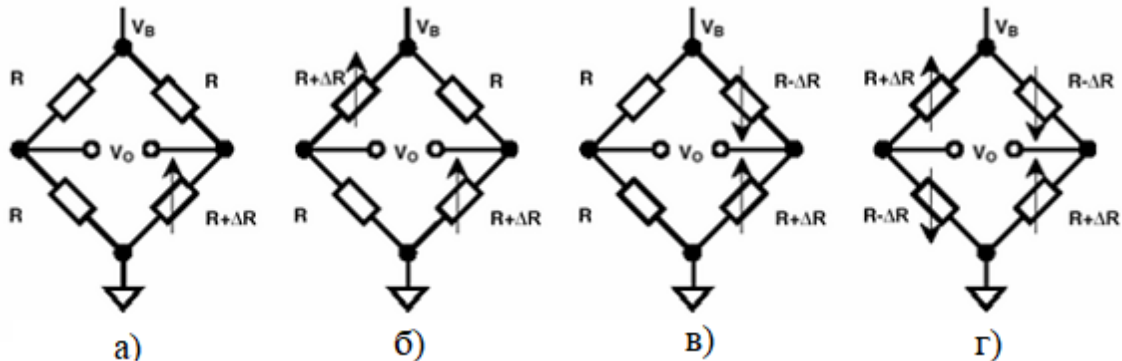


Рис.22 Схеми включення тензорезисторів у мостову схему: а)чвертьміст, б) напівміст, в)напівміст, г)повний міст.

У випадку із реалізацією схеми а) вихідна напруга буде представлено у наступному вигляді:

$$U_{\text{вих}} = \frac{V_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$$

Дана схема забезпечує нелінійність характеристики у 0.5%/%. При застосуванні схеми напівмоста, є декілька конфігурацій, в ході реалізації яких тензорезистори включають у суміжні або протилежні плечі мостової схеми. В першому випадку, рівняння вихідної напруги буде записано у вигляді:

$$U_{\text{вих}} = \frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$$

Нелінійність вихідної характеристики буде аналогічна схемі з чвертьмостом. При включенні тензорезисторів в суміжні плечу моста рівняння вихідної характеристики матиме вигляд:

$$U_{\text{вих}} = \frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$$

В останньому випадку реалізується схема повного моста і тоді вихідна напруга дорівнюватиме:

$$U_{\text{вих}} = V_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$$

Чвертьмостова конфігурація має один чутливий резистор. Залежність вихідного сигналу такого моста від відхилення опору ΔR одного з резисторів від номіналу нелінійна.

Півмостова конфігурація має два ідентичних активних резистивних перетворювача. Коефіцієнт передачі такої схеми в 2 рази вище ніж у чвертьмостової і залежність вихідного сигналу від ΔR лінійна.

Повномостова конфігурація має максимальний вихідний сигнал і лінійна за своєю природою. Крім того, така схема є одним з ефективних способів температурної компенсації у напівпровідникових тензорезисторів. Вихідний сигнал такого моста практично не залежить від температурного "відходу" опорів, так як тензорезистори знаходяться в однакових температурних умовах і зміна їх опорів взаємно компенсується. Даная схема широко застосовується в прецизійних тензорезистивних перетворювачах, що випускаються промисловістю.

Розглянемо переваги та недоліки усіх цих схем:

а) Схема «Чверть моста», двопровідне підключення.

Таке підключення є найбільш надійним і економічним через малу кількість проводів, але може бути використано тільки в разі, коли використовуються самотермокомпенсуючі датчики і температура навколишнього середовища практично не змінюється. Якщо ж температура середовища в процесі вимірювань непостійна, то температурна зміна опору з'єднувальних проводів сприймається вимірювальним пристроєм як деформація об'єкта випробувань

б) Схема «Чверть моста», трипровідне підключення.

Це один з найбільш широко поширених варіантів схемної компенсації температурної зміни опору сполучних проводів.

в) Схема «Напівміст», трипровідне підключення. Зазвичай другий тензорезистор в такій схемі є компенсаційним датчиком, тобто датчиком, наклеєним на ненавантажений зразок, виготовлений з такого ж матеріалу, що знаходиться в таких же температурних умовах, що і матеріал досліджуваної конструкції.

г) Схема «напівміст», п'ятипровідне підключення.

Напруга на виході моста ΔU залежить від напруги живлення моста U . У розглянутій схемі, на відміну від попередньої, напруга живлення моста U контролюється аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Далі передбачається введення програмним чином поправки на коливання напруги харчування. Така схема забезпечує надійні, високоточні вимірювання в умовах мінливої температури.

д) Схема «повний міст», чотирьохпровідне підключення датчиків.

В цьому випадку вимірювальний міст не сприйнятливий до температурних змін в датчиках, наклеєних на деталь, і до температурного зміни опору сполучних проводів за умови, що всі провідні лінії ідентичні. Схема нечутлива до зміни опору сполучних проводів від температури і до температурних

деформацій конструкції, якщо зміна температури в місцях наклейки всіх датчиків однакова.

ж) Схема шестипровідного підключення до вимірювального мосту відрізняється від попередньої більшою точністю вимірювань, так як введено ланцюг вимірювання напруги живлення моста з використанням АЦП.

На досліджуваних об'єктах великих розмірів довжина сполучних проводів від датчика до вимірювального пристрою може бути значною (рис. 14). З сполучними проводами можуть бути пов'язані дві проблеми – пониження рівня сигналу і температурна чутливість. Зменшення рівня сигналу відбувається тому, що знижується зміна відносного опору плеча моста $\frac{\Delta R_1}{(R_1+2R_1)}$.

З підвищенням температури питомий опір більшості металів збільшується. У зв'язку з цим зміна температури на величину призведе до зміни опору з'єднувального дроту:

$$\Delta R = \rho_0 \frac{1}{F} \alpha \Delta T$$

В якості сполучних проводів зазвичай використовують мідні багатожильні проводи перетином 0,1...0,75мм². Щоб зниження рівня сигналу було менше 1%, відношення R_L / R_I не повинно перевищувати 0,005.

Очевидно, слід уникати застосування довгих сполучних проводів малого перерізу. Зміна опору з'єднувальних провідників (ланцюгів харчування датчика) від температури призводить до зміни чутливості схеми, що вимагає проведення повторних калібрувань каналу вимірювань.

Ці висновки справедливі у випадку живлення вимірювального моста регульованою напругою. Якщо міст живиться регульованим струмом, то має місце незалежність чутливості вимірювального каналу від зміни опору з'єднувальних провідників, але при цьому, як правило, тензометрична апаратура не дозволяє проводити балансування вимірювального моста.

2.3 Аналіз впливу температурної похибки на ваговимірювальну систему

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		74

Майже всюди, в ході динамічного вимірювального процесу наявні певні явища, що вносять свої корективи у вигляді похибок в результат ваговимірювального процесу. Вплив небажаних явищ може виникати не лише при неправильній постановці вантажу на ваговимірювальну платформу а і в нестандартних або екстремальних умовах навколишнього середовища, внаслідок впливу вібрацій, ударів, нестабільного положення платформи, відхилення осі датчика від осі вимірювань, тощо.

Окрім основної, найбільш суттєвою складовою частиною мультиплікативної похибки для тензорезистивних ВП є температурна похибка[8] яка викликається зміною температури навколишнього середовища, та виникає через зміну пружних властивостей ЧЕ або через температурний дрейф мостової схеми. Без застосування методів температурної компенсації значення температурної похибки може значно перевершувати основну похибку тензорезисторного ВП сягаючи значень близько 5 – 10%.

Температурна похибка чутливого елемента зумовлена залежністю пружних властивостей чутливого елемента від температури. Зі збільшенням величини температури знижується модуль пружності ЧЕ. Для спеціалізованих сталей похибка від впливу вищенаведеного ефекту становить близько 1% на кожні 25 К. Ще одним фактором виникнення температурної похибки є деформація лінійних розмірів чутливого елемента при нагріванні. Температурна похибка тензорезисторного ЗВТ включає в себе температурний дрейф чутливості та температурний дрейф нуля тензорезисторів.

Зі зміною температури в часі з'являється динамічна складова температурної похибки, що зумовлена різницею теплової інерційності датчика температури та тензодатчика. Перший фактор зумовлений неможливістю миттєвої зміни теплового стану датчика і є джерелом динамічної похибки вимірювання температури, тобто невідповідності вихідного сигналу датчика до температури навколишнього середовища. На відміну від датчика

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

температури, тензодатчик має в декілька разів більшу теплову інерційність,. За рахунок цього, виміряне датчиком температури значення температури, у разі зміни в часі температури навколишнього середовища буде розходитись із температурою тензодатчика.

Зміна відносного опору тензорезистора в ході вимірювального експерименту залежить від декількох факторів: рівня вимірюваної деформації та величини зміни температури у місці встановлення тензометричного датчика. Зміна температури тензорезистивного елемента в місці його встановлення залежить від температурної варіативності навколишнього середовища в процесі вимірювань та від саморозігріву датчика, викликаного електричним струмом, що проходить через нього.

Знаючи кількість тепла, що виділяється струмом на тензорешітці, і умови охолодження можна визначити саморозігрів датчика. Умови охолодження залежать від габаритів досліджуваного об'єкта та коефіцієнту його теплопровідності, площі поверхні, займаної нитками решітки, коефіцієнт відношення поверхні решітки до її об'єму, товщини шару клею та коефіцієнту його теплопровідності, температурних варіацій навколишнього середовища та швидкості руху потоків повітря навколо деталі у місці наклеювання тензорезистивного елемента і т.д.

Питома потужність розсіювання дозволяє оцінити здатність датчика розсіювати теплову енергію. Дана характеристика залежить в першу чергу від товщини деталі та теплопровідності її матеріалу. Деталь виступає у ролі радіатора.

У табл. 6 наведені значення допустимої питомої потужності розсіювання в залежності від властивостей деталі.

Таблиця 6. Допустимі питомі потужності розсіювання

№ п/п	Вимірюваний об'єкт	W, Вт/мм ²
-------	--------------------	-----------------------

1	Пластмаса	0,00003...0,00008
2	Масивний сталевий прокат	0,003...0,008
3	Тонкий сталевий прокат	0,0015...0,003
4	Склопластик, кераміка, скло	0,0003...0,0008
5	Алюміній	0,008...0,0016

Для визначення робочого струму живлення датчика беруть за основну характеристику щільність струму 45 А/мм² для дротяних тензорезистивних елементів та 60 А / мм² - для фольгових, якщо сталева деталь габаритна.

Зі зміною температури датчика і деталі стає можливим спостерігати наступні фактори, здатні впливати на результати вимірювального процесу:

1. Змінюється коефіцієнт тензометричної чутливості S матеріалу тензометричної решітки. Для сплавів константан і карма ця залежність є лінійною функцією, показаною на рис. 8.

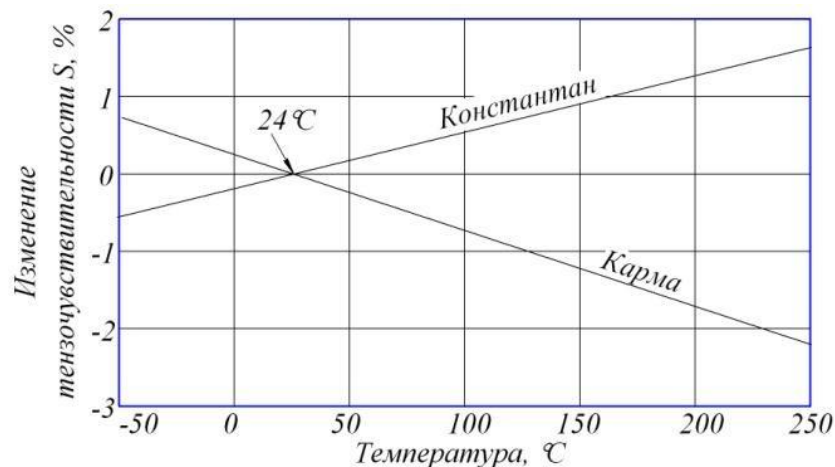


Рис. 8 Залежність тензочувствительності сплавів константан і карма від температури

Із графіку добре видно, що зміна коефіцієнту тензочувствительності на один градус вельми мізерна та складає +0,00735 для константану і -0,00975 для сплаву карма. Дані варіації при звичайному аналізі напругою не враховуються

2. При зміні температури подовжується (або скорочується) тензорешітка тензодатчика $\Delta L_{pT} = a\Delta T l$ і деталь $\Delta L_d = b\Delta T l_B$. Тут l_B – величина бази тензорезистивного елемента вимірювальної системи, a і b – коефіцієнти теплового розширення матеріалу решітки та деталі відповідно. Оскільки зазвичай жорсткість деталі набагато вища, ніж жорсткість тензорешітки, то в тензометричній решітці з'явиться механічна деформація.

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L_d - \Delta L_{pT}}{l} = (b - a)\Delta T$$

Реакція тензодатчика на деформацію T аналогічна реакції на деформацію досліджуваного зразка, яка зумовлена навантаженням, яке спричиняє виникнення додаткової температурної складової вихідного сигналу.

3. Температурний вплив на опір тензометричної решітки:

$$\Delta R = rR\Delta T$$

де r – температурний коефіцієнт опору матеріалу тензорешітки. Підсумовуючи найбільш істотні ефекти, отримуємо зміну опору наклеєного на деталь датчика від температури:

$$\frac{\Delta R}{R} = (b - a)S\Delta T + r\Delta T$$

Навіть за умови рівності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів тензодатчика і досліджуваного зразка $a = b$, уявна деформація визначається другим членом рівняння та не дорівнює нулю. Компенсація температурної похибки тензодатчика досягається лише за тієї умови, за якої обидва члени в рівнянні дорівнюють нулю, або взаємознищуються.

В процесі виробництва тензорезисторів вдається реалізувати останню умову компенсації температурної похибки. Коефіцієнти a та b володіють високою чутливістю до легування сплаву та режиму його холодної обробки у ході процесу фольгового прокату. Варіативність даних коефіцієнтів від однієї

плавки до іншої і від одного рулону до іншого дозволяє підбирати датчики, виготовлені на базі сплавів константан і карма, відносно різних конструкційних матеріалів. Вищеописані тензодатчики називають температурнокомпенсованими датчиками. Подібні датчики підбирають за STC кодом, відповідно до обраного матеріалу, який чисельно дорівнює значенню коефіцієнту теплового розширення матеріалу, збільшеному в 10^6 разів.

STC коди та температурна характеристика теплового розширення для деяких конструкційних матеріалів наведені в табл. 7.

Таблиця 7. S-T-C коди для різних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Коефіцієнт теплового розширення	S-T-C код
1	Феритова сталь	$10,8 \times 10^{-6}$	10,8
2	Алюміній	23×10^{-6}	23
3	Аустенітна сталь	16×10^{-6}	16
4	Титан	9×10^{-6}	9
5	Молібден	$5,4 \times 10^{-6}$	5,4

Домогтися повної температурної компенсації в широкому діапазоні температур не вдається через нелінійні члени, яких немає в рівнянні. Типові температурнокомпенсовані датчики легко виявляють присутність уявних деформацій, які варіюються зі зміною температури так, як показано на рис. 9.

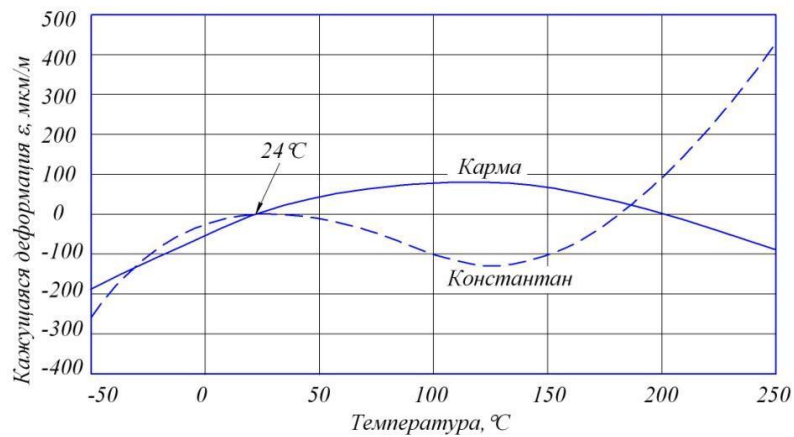


Рис. 9 Залежність уявної деформації від температури

Викликана зміною температури в кілька градусів уявна деформація в околиці рівня 24°C, досить мала [менше 0,5 мкм / (м×°C)]. Однак при істотних змінах вона стає значною, що потребує відповідної корекції.

Для термокомпенсації здійснюють вимірювання температури поблизу тензодатчика і використовують залежність уявної деформації від температури, аналогічну графіку на рис. 9, а також модифікують електричну схему ваговимірювального пристрою вдосконалюючи її інтеграцією балансуєчих та регулювальних опорів та терморезисторів.

2.4 Висновки

Виходячи із наведених вище даних можна визначити деякі з ключових характеристик системи, такі як тривалість перехідного процесу, величину та час перерегулювання, час встановлення робочого режиму та час заспокоєння збурення системи, величину смуги пропускання та полоси загородження, частоту зрізу, полюс передаточної функції та його частоту, величину спаду ЛФЧХ. З наявної амплітудно-фазочастотної характеристики можна зробити висновок про стійкість досліджуваної системи.

Застосування терморезистора з лінійною температурною характеристикою і мінімальним ТКС призвело до зниження максимального вихідного сигналу мостової схеми при цьому абсолютне значення

									Лист
									80
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	МД ПІ71мп.00.012. ПЗ				

температурної похибки чутливості вихідного сигналу також зменшилося. Рішення системи рівнянь можливо з використанням чисельних методів і може бути запрограмовано в мікроконтролері, що дозволить автоматизувати розробку діагностичного забезпечення інтелектуальних датчиків, до складу яких можуть входити мостові вимірювальні схеми та вторинні вимірювальні перетворювачі. Таким чином, застосування терморезистора дозволяє знизити температурну похибку чутливості високотемпературних напівпровідникових датчиків тиску на етапі проектування і виготовлення.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		81

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Опис експериментальної установки

Для визначення характеристик тензометричного перетворювача та впливу температурної похибки на результат вимірювального процесу, було пристосовано прес та термошафу(рис. 61), які імітували б відповідний вплив на ваговимірювальну систему. Експериментальні дослідження проводилися у два етапи.



Рис. 61 Лабораторний прес

Технічні характеристики пресу наведено у табл. 9.

Таблиця 9 Технічні характеристики лабораторного пресу

№ п/п	Найменування параметра	Значення
1	Найбільше граничне навантаження, кН (кгс)	2500 (250)
2	Діапазони показань, кН (кгс)	від 0 до 2500 (від 0 до 250000)
3	Діапазони вимірювання, кН (кгс)	від 500 до 2500 (від 50000 до 250000)

4	Ціна поділки відлікового пристрою, кН (кгс)	1 діапазон 2,5 (250) 2 діапазон 5 (500)
5	Допустима похибка вимірювання Навантаження при прямому ході (навантаженні), починаючи з 20% найбільшого значення діапазону вимірювання, але не нижче 10% найбільшої граничного навантаження,% величини вимірюваної навантаження ± 2	± 2
6	Варіація показань в діапазоні вимірювання,%	2



Рис. 62 Технічна термошафа для високотемпературних випробувань
Технічні характеристики термошафи представлені у табл. 2.

Таблиця 10 Технічні характеристики термошафи

№ п/п	Найменування параметра	Значення
1	Максимальна температура (°C)	600
2	Мінімальна температура (°C)	Окружающая +60
3	Стабільність температури (°C)	± 0.5
4	Рівномірність розподілу температури (°C)	$\pm 5.0 @ 250^{\circ}\text{C}$
5	Час нагріву (хв)	110
6	Час відновлення температури (хв)	20
7	Максимальна потужність (Вт)	4500

В експериментальних дослідженнях було виконано перевірку тензометричного перетворювача шляхом його навантаження з допомогою гідравлічного преса.

3.2 Схема передачі розміру навантаження

Динамічні властивості вимірювальних систем, в яких використовуються тензометричні датчики, характеризуються коливальними перехідними процесами. Точне значення ваги вантажу визначається після закінчення певного проміжку

часу, необхідного для загасання перехідного процесу на виході системи вимірювання. Структурна схема послідовності вимірювальних перетворень сили в напругу і далі - в код, наведена на рис. 5.

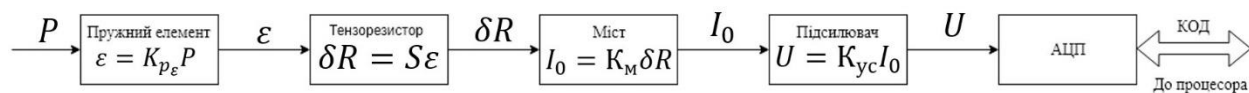


Рис.63. Структурна схема тензометричного перетворювача

На вхід ваговимірювальної системи подається навантаження P , що діє на пружний елемент, змушуючи його деформуватись. В свою чергу на чутливому елементі наклеєний тензорезистор, який, сприймаючи деформацію чутливого елемента, сам розтягується або стискається, що відповідним чином збільшує або зменшує його опір. Це призводить до розбалансування мостової схеми і виникнення в ній струму. Струм поступає на вхід підсилювача, де підсилюється для подальшої передачі. Напруга шифрується і передається далі на обробку з допомогою аналого-цифрового перетворювача.

В цілому коефіцієнт перетворення сили в напругу є добуток приватних коефіцієнтів перетворення:

$$K_p = K_{p\varepsilon} S K_M K_{ус} = K_{p\varepsilon} S I_1 (R5 + R6)$$

Вимірювання провідниковими тензорезисторами засноване на ефекті зміни електричного опору чутливої решітки при її деформації. при цьому зміна

омічного опору тензорезистора обумовлена двома явищами: зміною поздовжнього і поперечного розмірів провідника з одного боку і питомого опору матеріалу з іншого. Залежність виду:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + m)\varepsilon = S_T\varepsilon$$

називається основним рівнянням електротензометрії, де $\frac{\Delta R}{R}$ – відносна зміна активного опору чутливого елемента тензорезистора, мкОм / Ом;

3.3 Розробка методики експериментального дослідження вимірювального перетворювача

Для проведення експериментального дослідження пропонується використовувати нижченаведену методику, розроблену згідно із ГОСТ Р 54796-2011 та МОЗМ МР 51-1.

- 1) Виконання огляду до початку дослідження задля виявлення дефектів, несправностей та поломок.
- 2) Підключення ВП до джерела живлення на час, рівний або більший за час прогріву, що вказано виробником, та подальша його стабільна підтримка на протязі всього експериментального дослідження.
- 3) Тарування ВП перед початком кожного випробування, відрегулювання нульового положення на показ максимально близький до нульового значення. Калібрування датчика проводиться виключно перед випробуванням.
- 4) Динамічне налаштування виконується згідно з інструкцією виробника перед початком випробувань.
- 5) Статичні випробувальні навантаження.
- 6) Випробування слід проводити при стабільних умовах навколишнього

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		85

середовища, за виключенням ціленаправлених випробувань іншого типу.

7) Після кожного випробування прилад повинен мати достатню кількість часу для відновлення перед наступним випробуванням.

8) Перед кожним випробуванням ваговимірювальна система повинна бути навантаженою до максимуму за виключенням ціленаправлених випробувань іншого типу.

9) В ході випробувань кожен діапазон повинен бути досліджений як самостійні ваги.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		86

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ВАГИ З СИСТЕМОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОХИБКИ»

4.1 Опис ідеї проекту

У зв'язку із загальним розвитком людства та ходом технічного прогресу ваговимірювальний процес в нестандартних, зокрема температурних, умовах користується на сьогоднішній день великою популярністю у різноманітних галузях науки та техніки. Нажаль у процесі вимірювання ваги наявні похибки різного роду і характеру походження що суттєво ускладнює здавалося б такий простий процес. Вібрації різної частоти і амплітуди, різка зміна температурного режиму, відхилення вимірювальної осі тензодатчика від осі прикладання сили в результаті неправильної установки тензOMETричного датчика, тощо.

Головна суть ідеї проекту полягає в оснащенні складових датчиків ваговимірювальної системи додатковими терморезисторами, встановленими на окремий, ненавантажений зразок матеріалу, з якого виготовлено чутливий елемент тензOMETричного датчика, інтегрованого в корпус датчика і термопарою.

Ваговимірювальна система є комплексом, що складається з декількох, переважно із чотирьох тензOMETричних датчиків із описаними вище конструктивними модифікаціями, з'єднаних у один ваговимірювальний масив за допомогою з'єднувальної коробки. Модифікація володіє низькою собівартістю і не здатна чинити значний вплив на кінцеву ціну виробу і при цьому володіє значно покращеними метрологічними характеристиками.

Даний вид систем доволі широко використовується в багатьох галузях, зокрема в ливарній промисловості, масштабній торгівлі, будівництві, металургійній промисловості, тощо. Тобто скрізь, де необхідно реалізувати точний хід ваговимірювального процесу.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		87

В межах даного підрозділу детально розглянуто та подано у вигляді таблиць: головний зміст ідеї; можливі напрямки застосування даного інженерногорішення; основні переваги, які може отримати користувач при використанні даного виробу та відмінності від існуючих аналогів та заміників;

Таблиця 11 Опис ідеї стартап проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Переваги для користувача</i>
Двоканальний тензометричний датчик навантаження із термокомпенсацією	1. Металургія	Точне вимірювання ваги ливарної суміші, зменшення температурної похибки.
	2. Гірничодобувна промисловість	Точне вимірювання ваги гірської породи, зменшення температурної похибки.

Висновок: В даній таблиці наведені основні напрямки застосування запропонованої ваговимірювальної системи із компенсацією температурної похибки. Основними споживачами виробу є представники летаргійної галузі, будівельних та гірничодобувних компаній.

Таблиця 12 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко – економічні характерист ики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтра льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	B8D	HM11			
1	Витрати	30000	40000	60000			+
2	Маса, кг	50	50	50		+	
3	Надійність	Система компенсації температурної похибки	-	Вибухо та іскрозах ищеніст ь			+
4	Захищеність	IP68	IP68	IP68		+	
5	Технологічніс ть	75%	80%	80%	+		
6	Точність	0,01	0,1	0,05			+

Висновки: при порівнянні із головними конкурентами товар володіє рядом переваг – це в першу чергу вартість, показники точності та надійності. Коефіцієнт технологічності даного виробу викликає сумніви, оскільки при впровадженні у виробництво доведеться змінювати технологію, але ці зміни не потребують глобального масштабу і в результаті виготовлений датчик здатний працювати із мінімальною температурною похибкою у всьому температурному діапазоні вимірювань. Подібна система компенсації температурної похибки робить прилад унікальним на ринку.

4.1.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 13 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення точності показників	Використання спеціальної схеми та датчиків	Наявна	Доступна
2	Компенсація впливу температурної похибки	Впровадження компенсуючої ланки	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія реалізації ідеї спирається на включення в вимірювальну систему додаткових датчиків, що дає змогу компенсувати вплив температури на результат вимірювального процесу на протязі всього вимірювального та температурного діапазону. Це дасть змогу виділитися на ринку серед конкурентів, адже це збільшить показники точності вимірювань. При цьому не потребує значних ресурсів і змін технологічного процесу.				

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 14 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ n/n	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж грн/ум.од	160000
3	Динаміка ринку	зростає
4	Наявність обмежень для входу	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації і сертифікації	–
6	Середня норма рентабельності в галузі	40%

Висновки: Із таблиці добре видно що вихід на ринок буде доволі

рентабельним рішенням. Відносно невелика кількість гравців на ринку свідчить про високий поріг входу, що в свою чергу свідчить про мінімальну конкуренцію. Враховуючи, що більшість підприємств знаходяться за межами України і відповідно слабо розвинені на її території, вони не мають сервісної підтримки на території країн-партнерів на відміну від даного проекту. За умови правильного підходу до реалізації, акцентуючи увагу на високій якості виробничого процесу, відносно невисокій, конкурентоспроможній ціні, уніфікованості конструкції та національному виробництві з'являється можливість швидкого входу в обраний сегмент ринку України а згодом і Європи. Достатньо високий коефіцієнт рентабельності дає змогу відносно швидко відбити фінансові витрати.

Таблиця 15 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Вимірювання ваги в нестандартних температурних умовах	– Металургійна – Будівельна – Транспортна	Особливості, викликані спеціфікою проведення вимірювань: температурних та погодних умов, навколишнього середовища приводять до необхідності модифікації існуючих систем	– Точність – Надійність

Висновок: Виходячи з аналізу потенційних клієнтів стартап-проекту було визначено, що головні сфери представлені металургійною , будівельною та транспортною промисловістю. Зважаючи на це, головними вимогами до товару є точність показань, надійність та довговічність роботи.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		90

Таблиця 16 Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Менша ціна у конкурента, наявність аналогічної технології	Відтік клієнтів
2	Економічний	Економічний стан країни– виробника	Відмова від продукту
3	Якість	Неякісний процес збирання приладу	Відмова від продукту
4	Вартість комплектуючих	Підвищення закупівельної вартості комплектуючих деталей	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази
5	Патентні позови	Позови від компаній – конкурентів	Відстоювання прав компанії

Висновки: головним фактором загроз є конкуренція. Вже сформований ринок з існуючими технологічними рішеннями у даній галузі, що мають певну репутацію та масштабні об'єми виробництва. Конкурентоспроможні компанії здатні впровадити аналогічну технологію та відбити частину клієнтів.

Таблиця 17 Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Ріст зацікавлених у продукції	Впровадження уніфікованої системи призведе до збільшення кількості зацікавлених	Збільшення масштабів виробництва, розширення
2	Освоєння нових сфер	Підвищення якісних характеристик призведе до збільшення діапазону сфер використання приладу	Впровадження додаткових інноваційних систем на замовлення
3	Індивідуальне замовлення	Потреба клієнта в оснащенні новими якістьями відповідно до специфічних умов експлуатації товару	Оцінка відношення прибутку до витрат, заключення контракту та погодження умов
4	Унікальність	Ліцензійне виробництво	Збільшення конкурентоспроможності компанії, створення уніфікованого продукту
5	Технологічність	Підвищений рівень якості вимірювального процесу	Впровадження нових інженерних рішень

Висновки: З таблиці аналізу факторів можливостей видно що

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		91

збільшення кількості зацікавлених у товарі осіб призведе до росту потреби ринку, що в свою чергу призведе до збільшення обсягів виробництва та продажів. Це слугуватиме поштовхом до збільшення кількості замовлень, розвитку в даній сфері, впровадження інновацій та здобуття авторитету на ринку. В особливих випадках можливе виробництво на замовлення із впровадженням або покращенням необхідних метрологічних характеристик в вимірювальну систему.

Таблиця 18 Фактори можливостей

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства</i>
1. Тип конкуренції – чиста конкуренція	Мала кількість постачальників продукту	– висока якість – конкурентна ціна – впровадження інновацій – відповідність ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Наявність закордонних споживачів	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою – міжгалузева	Використання у різних сферах промисловості	PR-кампанія та менеджмент по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно – видова	Один вид пропонованого товару	Адаптація до ринкових умов та клієнтоорієнтовність компанії
5. За характером конкурентних переваг – цінова	Вартість залежить від характеристик точності	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю – марочна	Вибір постачальника по бренду	Рекламна кампанія бренду

Висновки: В результаті аналізу факторів можливостей видно що рівень конкурентної боротьби носить міжнародний характер із міжгалузевою ознакою. В даному випадку має місце видова конкуренція за видами товарів. На ринку присутня чиста конкуренція через неможливість впливу гравців на ціну.

Таблиця 22 Альтернативи ринкового впровадження стартап – проекту

№ n/n	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Середня	4 міс
2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Висока	8 міс
3	Суперництво	Нижче середнього	17 міс

Висновки: В результаті аналізу альтернатив ринкового впровадження стартап-проекту в якості альтернативної ринкової поведінки було обрано кооперацію через наявність високої ймовірності повернення витрачених ресурсів.

4.3 Розробка ринкової стратегії проекту

Таблиця 23 Вибір груп потенційних споживачів

№ n/n	Опис профілю потенційної групи цільових клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Металургія	+	+	Висока	+
2	Транспортні компанії	+	-	Висока	-
3	Будівельні компанії	-	+	Середня	-

Під час аналізу та вибору цільової групи увага в першу чергу акцентувалася на готовності споживача з обраної групи клієнтів прийняти продукт. Продукт повністю відповідає та задовольняє вимоги металургійної промисловості. Транспортна та будівельна кампанія є більш гнучкими і мають більшу конкуренцію в цій сфері за рахунок відсутності екстремальних температурних умов.

Таблиця 24 Вибір базової стратегії розвитку

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні пропозиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*

1	Індивідуалізм	Стратегія недиференційованого маркетингу	Адаптація до вимог ринку, використання новацій	Стратегія спеціалізації
---	---------------	--	--	-------------------------

Висновки: Стратегія індивідуалізму була обрана через наявність на ринку авторитетних гравців з наявністю безпосереднього контакту із групою споживачів. На початку розвитку проекту рекомендується брати за стратегію розвитку стратегію спеціалізації для того, щоб отримати деякий авторитет і ім'я на ринку та зайняти певну нішу.

Таблиця 25 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	—	Компанія буде забирати існуючих паралельно до цього шукаючи нових.	Копіювання відбудеться лише у випадку наявності у конкурента кращих технологій, особливий акцент робиться на точність, надійність та здатність працювати у важких температурних умовах.	Стратегія виклику лідера

Висновок: Дивлячись на те, що компанія не є першопрохідцем у даному ринковому сегменті і має значні переваги у порівнянні із своїм найближчим конкурентом, рекомендується дотримуватися стратегії виклику лідера у якості стратегії конкурентної поведінки. Дана стратегія доступна і можлива для реалізації за рахунок наявності у компанії уніфікованої системи термокомпенсації.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Підпись	Дата		96

Таблиця 26 Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п / п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту</i>
1	Точність	Стратегія спеціалізації	Впровадження інновацій	Високоточна
2	Робота у важких експлуатаційних умовах			Використання у екстремальних експлуатаційних умовах

Висновки: Завдяки впровадженню інноваційної системи компенсації температурної похибки у потенційного користувача повинні виникнути асоціації із точною ваговимірною системою, здатною працювати в екстремальних температурних умовах використання.

Таблиця 27 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами</i>
1	Необхідність точного вимірювання у екстремальних температурних умовах при впливі підвищених температур	Надійна, температурно – компенсована на всьому вимірювальному діапазоні, система тензометричних вагів.	Ціна, точність, надійність, робота в екстремальних умовах, наявність сервісного центру.

Висновки: В ході аналізу ключових переваг концепції потенційного товару було визначено такі переваги як надійність, робота в нестандартних умовах та унікальна риса – компенсація температурної похибки на протязі всього вимірювального діапазону, за рахунок чого стає можливим створення ефективної клієнтоорієнтовної рекламної кампанії та донесення цільового повідомлення до кінцевого споживача товару.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпись</i>	<i>Дата</i>		97

Таблиця 28 Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Засіб реалізує точний ваговимірвальний процес у екстремальних температурних умовах за допомогою тензометричних датчиків навантаження із системою компенсації температурної похибки. Це надає можливість безкомпромісного використання засобу в умовах підвищених температур, у ливарному цеху, тощо.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тп/Е/Ор
	1. НГВ	1.5 т	Т
	2. Точність	0,01	х
	3. Надійність	IP68	Т
	4. Вартість	5000	х
			Т
			х
			Е
	Якість: сертифікати відповідно до стандартів ISO та IEEE		
	Пакування		
	Марка: TDK		
III. Товар із підкріпленням	До продажу повна комплектація, яку потребує замовник		
	Після продажу підтримка сервісного центру, гарантійне обслуговування товару.		
Захист товару забезпечується шляхом патентування та уніфікування приладу, проведення заходів захисту програмного та апаратного забезпечення.			

Висновки: В якості основного способу захисту продукту від підробок обрано патентування програмних та апаратних рішень, впроваджених у приладі та його загальна сертифікація. Закладені метрологічні характеристики роблять товар унікальним в межах обраного ринкового сегменту.

Таблиця 29 Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари замітники</i>	<i>Рівень цін на товари аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	30000-100000	40000-80000	300000-700000 у.о.	70000-40000 у.о.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпись</i>	<i>Дата</i>		98

Висновки: В результаті аналізу ринкової цінової політики було обрано середню цінову категорію для даної групи товарів задля того, щоб привабити клієнта вигідним співвідношенням ціни та якості.

Таблиця 30 Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Продаж	Повний супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: В якості основного каналу збуту було обрано канал продажу так як на початковому етапі виробництва його масштаби не будуть задовольняти потреби масового виробництва, тому недоцільно використовувати підрядників для реалізації товару. Враховуючи цей факт, було обрано нульовий рівень глибини каналу збуту. За оптимальну систему збуту було обрано пряму.

Таблиця 31 Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій які використовують цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції для позиціювання</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Зовнішні обставини спонукають споживача до пошуку рішення	– SMM – Реклама – Сайт виробника	– Точність – Вимірювання в екстремальних умовах – Компенсація температурної похибки	Донесення можливостей отримання більшого прибутку за умови використання даного продукту	Унікальність система в порівнянні із конкурентами
2	Зацікавленість в продукції	– Виставочні заходи на обрану тематику			Демонстрація можливостей та особливостей система на спеціальних оглядових стендах

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу в інформаційних ресурсах, що пов'язані зі сферами використання приладу, на тематичних заходах та виставках, сайті виробника, інформаційних рекламних буклетах та ін. Медіа вміст буде спрямований на показ унікальних особливостей та можливостей продукту в порівнянні із конкурентами. На виставкових заходах можлива демонстрація вимірювальної системи, її переваг та можливостей.

4.4 Висновки

Даний розділ присвячено розробці першого етапу стартап-проекту. Будь-яка наукова діяльність, наукові відкриття та інновації повинні мати практичну сторону застосування і в результаті шляхи для виходу на комерційну основу. Для цього розроблена ідея повинна бути розглянута як бізнес модель та представлена зацікавленому колу підприємств або державних установ для підтримки та реалізації всього проекту.

Для початку було презентовано саму ідею: висвітлено її суть, напрямки застосування та потенційну вигоду для користувача. Були виокремлені основні сфери застосування: металургія, гірничодобувна та будівельна галузі. Було проведено аналіз сильних та слабких характеристик проекту на основі критичного огляду та порівняння із конкурентами.

Було проведено технологічний аудит та аналіз ринкових можливостей, складено порівняльну характеристику із основними галузевими конкурентами в даному ринковому сегменті. До основних конкурентних факторів віднесли точність та можливість роботи у екстремальних умовах навколишнього середовища. Усі ці якості реалізовані завдяки впровадженню уніфікованої системи компенсації температурної похибки. Ця інновація робить виріб уніфікованим та єдиним у своєму роді.

В якості ринкової форми впровадження проекту було обрано

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		100

кооперацію, тому що для впровадження даної системи немає потреби у значних змінах технологічного процесу і для її реалізації підійде стандартна конструкція тензометричного датчика, який після модернізації з допомогою системи термокомпенсації буде володіти уніфікованими метрологічними характеристиками у порівнянні з іншими товарами в межах обраного ринкового сегменту. Дана властивість дозволить звести до мінімуму час між виготовленням продукту та отриманням першого прибутку, а кооперація з авторитетним відомим виробником у даній сфері дозволить реалізувати ефективну та продуктивну рекламну кампанію приладу та його унікальної системи. Для даного проекту буде доцільною його подальша імплементація. Для популяризації бренду та продукту в цілому було обрано технологію SMM для запуску рекламної кампанії серед тематично –орієнтованих веб–сайтів. При цьому є обов’язковою наявність інформативного сайту компанії, прийом участі у конференціях та виставках на дану тематику для демонстрації роботи та можливостей системи та здобуття авторитету серед потенційних покупців.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		101

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Температурна похибка являє собою одну із найбільш серйозних перешкод, яка стоїть на заваді точної тензометрії. В ході виконання магістерської дисертації було розглянуто питання впливу температурних похибок на хід тензометричного вимірювального процесу. В результаті була розроблена та випробувана система температурної компенсації, яка дозволяє значно зменшити динамічну складову температурної похибки, обумовлену варіативністю температурної складової вимірювального процесу. Було проведено перевірку тензометричного датчика за допомогою гідравлічного пресу. Дані вихідного сигналу тензометричного перетворювача навантаження були детально проаналізовані та оброблені. Застосування запропонованого способу дозволяє підвищити точність тензорезисторних ЗВТ при їх роботі в умовах зміни температури навколишнього середовища.

В результаті аналізу експериментальних даних було зроблено наступні висновки:

1) Високоточний вимірювальний процес у нестандартних або екстремальних умовах навколишнього середовища у наш час набуває все більшої популярності за рахунок загального технологічного розвитку та модернізації індустріальних систем. Існує ряд проблем, які слід подолати аби втілити подібний процес у реальність. Одним із найголовніших факторів, що впливають на хід вимірювального процесу є нестандартні температурні умови навколишнього середовища, які спричиняють температурну похибку. В результаті впливу цієї похибки збільшується загальна похибка вимірювального процесу, тому можна зробити висновок, що вплив температури грає суттєву роль по відношенню до точних показів, тому індустрія потребує розробки методів та засобів для її подолання.

2) В результаті експериментальних досліджень було доведено що даний вид датчиків не тільки не поступається, а і перевершує нині існуючі за деякими метрологічними параметрами.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		102

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Анализ методов и средств измерения технологического параметра (физической величины) [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа до ресурсу:
https://studbooks.net/1831509/tovarovedenie/magnitouprugie_datchiki_vesa
2. ООО "ЗЕМИК" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<http://zemicusa.info>.
3. KELI Sensor (Ningbo) [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://keli.com.ua/>.
4. Датчики ZEMIC и их температурные диапазоны [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <http://zemicusa.info/poleznye-stati/244-datchiki-zemic-i-ikh-temperaturnye-diapazonny>.
5. HBM - Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gaug [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.hbm.com/en/>.
6. Комплексы контроля параметров ГТД. Канал измерения давления [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://works.doklad.ru/view/hS_rRN6ElQ8/all.html.
7. Мехеда В.А. М 55 Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
8. Потильчак О. П. Особенности компенсации температурной погрешности тензорезисторных средств измерительной техники при изменении температуры окружающей среды / О. П. Потильчак // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. - 2014. - Вип. 47. - С. 66-71. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2014_47_12

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		103

9. ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА В СИСТЕМЕ
ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА / К. О. Разнополов, А. А. Лебедев, О. А.
Разнополов. – 2008. – №3. – С. 26–28.

					МД ПІ71мп.00.012. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		104