

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
«МІКРОЕЛЕКТРОННІ ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи МНТ-23м
спеціальності 176 – Мікро- та наносистемна
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Муравський О.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. доцент каф. ІКСТ

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 176 Мікро- та наносистемна техніка
Освітньо-професійна програма – Мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«14» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Муравському Олександр Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі»

керівник роботи д.т.н., проф., зав. кафедри ІРТС Осадчук О.В.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 17.09.2024 р. №310.

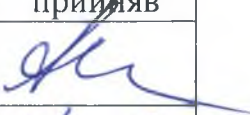
2. Строк подання студентом роботи 12.12.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Опір тензорезистора 100 Ом, вхідна напруга 10В, калібрований коефіцієнт тензодатчика 2, коефіцієнт підсилення в підсилювачі 0.2.

4. Зміст текстової частини: Аналіз сучасного стану використання тензодатчиків. Аналіз та систематизування даних про виробництво та використання тензометричних перетворювачів Розробка математичної моделі тензометричної системи в програмному середовищі MATLAB SIMULINK. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схематичне зображення схеми підключення, структура математичної моделі тензометричної системи, математична модель вихідної напруги, вихідні характеристики постійного значення, імітація статичного вимірювання за допомогою блока рівномірних випадкових значень, імітація статичного вимірювання за допомогою блока рівномірних значень в приближеному вигляді.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	зав. каф. ІРТС, професор д.т.н. Осадчук О.В.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання 16.09.2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2024-07.09.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2024-16.09.2024	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	17.09.2024-30.09.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2024-20.10.2024	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2024-04.11.2024	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2024-15.11.2024	
7.	Економічна частина.	16.11.2024-25.11.2024	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	26.11.2024-01.12.2024	
9.	Нормоконтроль.	02.12.2024-09.12.2024	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2024-11.12.2024	
11.	Захист МКР ЕК.	13.12.2024	

Студент

Муравський О.О.

Керівник роботи

Осадчук О.В.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Муравський О.О. Мікроелектронні тензометричні перетворювачі. Магістерська кваліфікаційна робота.— Вінниця: ВНТУ, 2024. — 121с. На українській мові. Бібліогр.: 28 назв; Табл. 11; Рис. 37.

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасного стану розвитку тензодатчиків та тензометричних перетворювачів. Проаналізовано види та типи тензодатчиків та тензометричних перетворювачів, їх переваги та недоліки у використанні. Запропоновано різні методи покращення продуктивності їх роботи. Розроблено математичну модель тензометричної системи вимірювань.

У другому розділі для полегшення подальшого моделювання тензометричної системи вимірювань було детальніше розглянуто різні конструкції тензометричних перетворювачів та обрано найбільш оптимальну для подальшого моделювання.

У третьому розділі на основі схеми Уінстона було побудовано математичну модель тензометричної системи вимірювань. За допомогою математичної моделі було проведено модуляцію та проведено аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: тензодатчик, тензометричних перетворювач, тензометрична система вимірювань.

ABSTRACT

Muravskyi O.O. Microelectronic strain gauge transducers. Master's qualification work.– Vinnytsia: VNTU, 2024. – 121p. In Ukrainian. Bibliography: 28 titles; Table. 11; Fig. 37.

In the master's qualification work, an analysis of the current state of development of strain gauges and strain gauge transducers was conducted. Types and types of strain gauges and strain gauge transducers, their advantages and disadvantages in use were analyzed. Various methods for improving their performance were proposed. A mathematical model of the strain gauge measurement system was developed.

In the second section, to facilitate further modeling of the strain gauge measurement system, various designs of strain gauge transducers were considered in more detail and the most optimal one was selected for further modeling.

In the third section, a mathematical model of the strain gauge measurement system was built based on the Winston scheme. Using a mathematical model, modulation was performed and the results were analyzed.

Keywords: strain gauge, strain gauge transducer, strain gauge measurement system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕНЗОДАТЧИКИ ТА ЇХ ВИДИ	10
1.1 Металеві тензодатчики	10
1.2 Принцип роботи тензодатчика.....	22
1.3 Система вимірювання зміни опору тензодатчика	27
1.4 Критерії вибору тензодатчиків	29
1.5 Висновки до розділу	34
2 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ ТЕНЗОДАТЧИКІВ	35
2.1 Види тензометричних перетворювачів.....	35
2.2 Види тензодатчиків	37
2.3 Тензорезистивні ланцюги для визначення градієнтів напружень	44
2.4 Розетки тензодатчиків для визначення стану напружень	47
2.5 Перетворювачі на основі тензодатчиків.....	52
2.6 З'єднаний тензодатчик як елемент перетворювача	56
2.7 Переваги та недоліки тензометричних перетворювачів	61
2.8 Пружинні елементи.....	63
2.9 Елементи згинання.....	71
2.10 Підвищення продуктивності	73
2.11 Висновки до розділу	75

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ В ПРОГРАМІ MATLAB SIMULINK	76
3.1 Принципи роботи тензометричної системи	76
3.2 Створення програмної моделі тензометричної системи вимірювання	78
3.3 Дослідження вихідних характеристик	80
3.4 Висновки до розділу	82
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	83
4.1 Оцінювання наукового ефекту	84
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	89
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	108
4.4 Висновок до розділу	110
ВИСНОВКИ	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	115
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи	120

ВСТУП

Актуальність: Останнім часом величезну популярність здобули сучасні тензометричні системи вимірювання, які застосовуються в автомобільному, залізничному, авіаційному та судновому транспорті, а також у целюлозній, паперовій, металургійній промисловості. Дані метрологічні системи забезпечують точне вимірювання в важких експлуатаційних умовах. Найбільшу популярність серед датчиків сили отримали тензодатчики, вони все більше застосовуються в різних галузях. Вони є оптимальним рішенням у галузі вимірювання.

Мета: Дослідити та проаналізувати відомості про тензодатчики та тензометричні перетворювачі, розробити програмну модель тензометричної системи вимірювання та провести аналіз вихідних характеристик.

Об'єкт дослідження: Об'єктом дослідження є мікроелектронний тензометричний перетворювач.

Предмет дослідження: Предметом дослідження є параметри та характеристики тензометричних перетворювачів.

Для досягнення поставленої мети в магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються наступні задачі: Збір та аналіз даних про тензодатчики та тензометричні перетворювачі, аналіз переваг та недоліків різних видів та типів тензодатчиків та тензометричних перетворювачів, розробка можливих шляхів покращення роботи тензометричних перетворювачів, розробка математичної моделі тензометричної системи вимірювання, аналіз вихідних даних моделювання.

Методи дослідження ґрунтуються на: детальному вивченні фізичних і механічних властивостей тензометричних перетворювачів, що дає можливість точно вимірювати деформації та перетворювати їх у електричні сигнали. В

основі цих методів лежить застосування принципу зміни опору резистивних матеріалів під впливом механічного навантаження, що дозволяє створювати високоточні вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів: Наукова новизна роботи полягає в глибокому дослідженні та розробці нових підходів до створення більш точних, стабільних і чутливих тензометричних систем, здатних працювати в умовах складних технічних і екстремальних середовищ.

Практичне значення одержаних результатів: На основі отриманих результатів аналізу та математичного моделювання можуть проводитись подальші дослідження з покращення роботи тензометричних перетворювачів.

Особистий внесок здобувача: Систематизовано відомості про тензометричні перетворювачі, запропоновано декілька варіантів покращення роботи перетворювачів, розроблено математичну модель тензометричної системи вимірювань.

Структура та обсяг роботи: магістерська кваліфікаційна робота складається з 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 ТЕНЗОДАТЧИКИ ТА ЇХ ВИДИ

1.1 Металеві тензодатчики

У другій половині 1930-х років увагу було приділено ефекту, про який Чарльз Вітстон згадував ще в 1843 році у своїй першій публікації про винайдену ним мостову схему [1, 2]. Цей ефект являє собою зміну опору в електричному провіднику внаслідок дії механічної напруги. Вільям Томсон (1824-1905, лорд Кельвін після 1892) пішов далі з деякою роботою, опублікованою в 1856 році [3]. Існує ряд причин, чому минуло понад 80 років, перш ніж відбулося технічне застосування цього явища. Зміна опору дроту при натягу дуже мала. Для своїх вимірювань Томсон використовував високочутливі гальванометри, які непридатні для загальних технічних застосувань або для використання в промисловості. Вони також придатні лише для вимірювання статичних процесів. Лише з появою електронного підсилювача ці вимоги були виконані.

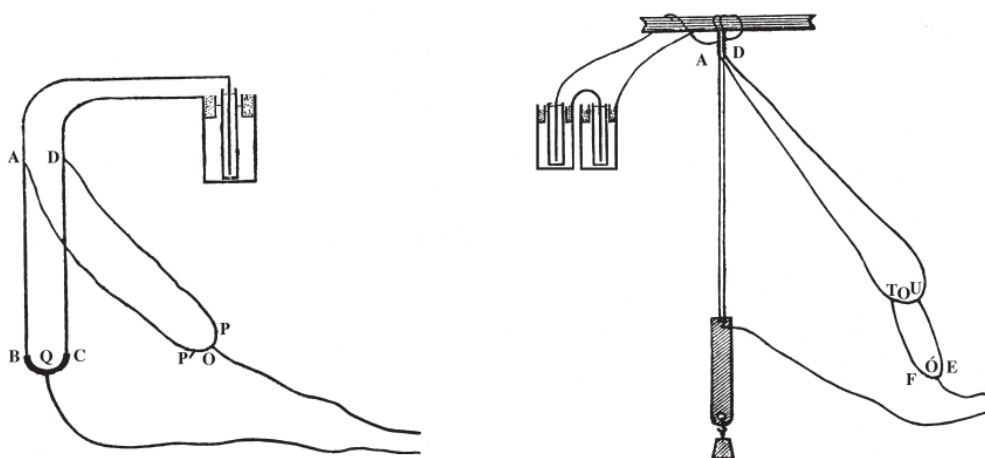


Рисунок 1.1 - Випробувальна установка Вільяма Томсона для дослідження зміни опору електричних провідників під дією механічних навантажень

У Німеччині перші дослідження для пояснення ефекту були проведені в Науково-дослідному інституті авіації, але вони не були продовжені. Карбонові стрічки для вимірювання деформації, розроблені AEG, виявилися малопридатними. Протягом 1938 року в США дві людини майже одночасно, але незалежно один від одного, працювали над ідеєю використання «ефекту Томсона» для вимірювань. Розробка, яка призвела до створення тензодатчика та його подальшого широкого застосування, детально описана в [4]. Один із цих двох людей, Едвард Е. Сіммонс, працював у Каліфорнії. Використовуючи шовкову нитку як основу та тонкий опорний дріт як уток, він виготовив тканий матеріал, який наклеїв на сталевий циліндр, і виготовив електричний пристрій для вимірювання імпульсів сили, що діє на зразок машиною для випробувань на удар маятникового штока, рисунок 1.1. Артур Клод Руге працював на факультеті сейсмології в Массачусетському технологічному інституті і хотів виміряти напругу через імітацію вібрацій під час землетрусу на моделі сейсмостійкого резервуара для води.

Обладнання для вимірювання деформації, доступне на той час, не можна було використовувати на дуже тонкостінній моделі. З безлічі різних пристроїв жоден не підходив. Для того, щоб дослідити властивості цього прототипу пристрою, він приклеїв його до гнучкої балки та порівняв вимірювання традиційним приладом для вимірювання деформації. Він знайшов хорошу кореляцію з а лінійна залежність між деформацією та відображеними значеннями в повному діапазоні вимірювань, як з позитивною, так і з негативною, тобто деформацією стиснення, включаючи хороший нуль точкова стабільність. Так був винайдений «тензодатчик електричного опору зі скріпленою сіткою». Форма, використана в тих перших випробуваннях, була такою ж, як і сьогодні.

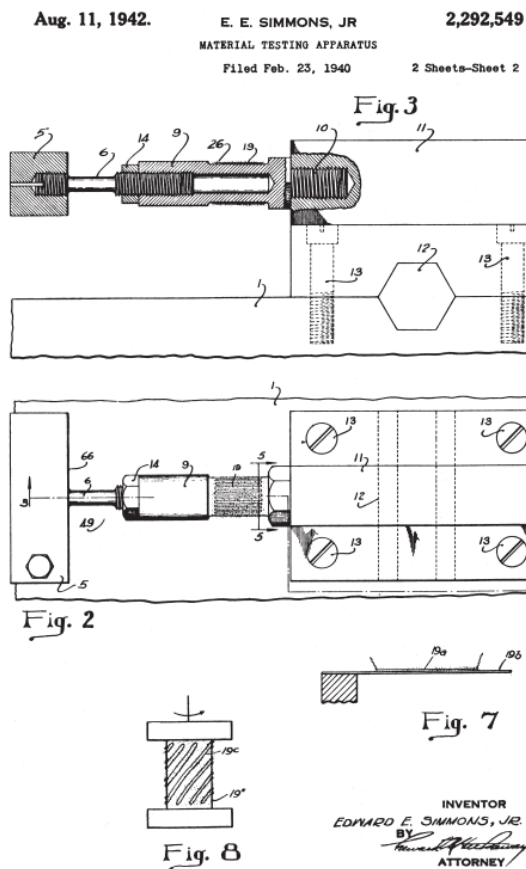


Рисунок 1.2 - Силувимірювач Е. Е. Сіммонса. Імпульс сили, який необхідно виміряти, діє в осьовому напрямку

Основна відмінність між ідеєю Руге та ідеєю Сіммонса полягала в тому, що Рудж закріпив вимірювальний дріт на несучому матеріалі, створивши незалежний вимірювальний інструмент, який був простим у використанні та міг бути приклеєний до будь-якої поверхні. Він був дуже тонким і легким, не потребував затискної сили і практично не створював зворотного зв'язку, що дозволяло вимірювати дуже тонкі об'єкти. Навіть перші прототипи тензодатчика виявилися кращими за попередні прилади для вимірювання деформації в усіх відношеннях. Другим досягненням Руге було переведення розробки тензодатчика на стадію виробництва, і саме цей останній крок став

ознаменуванням переваги тензодатчика. Тому цілком доречно називати Руге батьком тензодатчика. Він мав не лише ідею, але й зміг побачити широкі можливості її застосування та мав рішучість, необхідну для того, щоб перетворити тензодатчик на надійний інструмент для аналізу напруг. Спочатку вважалося, що тонку конструкцію потрібно закріпити на міцній опорі, а тонкі дроти товщиною всього 25 мкм повинні бути захищені повстаним покриттям. На рисунку 1.2 показаний приклад першого виробничого тензодатчика.

Попит, особливо з боку американської авіаційної промисловості, був настільки великий, що від цього будівництва довелося відмовитися. (Татнолл згадує про оборот у 1941 році 50 000 тензодатчиків за 2 місяці [4]). Згодом досвід показав, що складна опорна конструкція була непотрібною, і була введена спрощена модель, показана на рисунку 1.3. Цей дизайн зберігався лише з невеликими змінами протягом кількох десятиліть. Численні патенти є свідченням постійних зусиль Руге щодо вдосконалення вимірювальних характеристик.

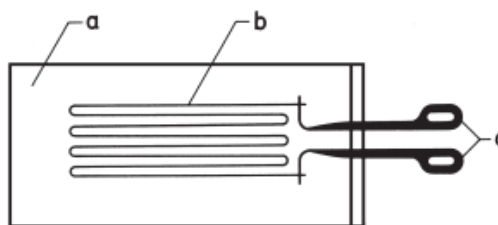


Рисунок 1.3 - Характерна конструкція вимірювального приладу з його дрітаною вимірювальною сіткою

а) матеріал-носія

b) вимірювальна сітка

c) з'єднання

У наступний період були випробувані різні модифікації з метою раціоналізації виробництва. Тут слід згадати техніку «друкованої схеми» Пола Ейслера, яка у своїй удосконаленій формі призвела до розробки «фольгового тензодатчика» приблизно з 1952 року [3].

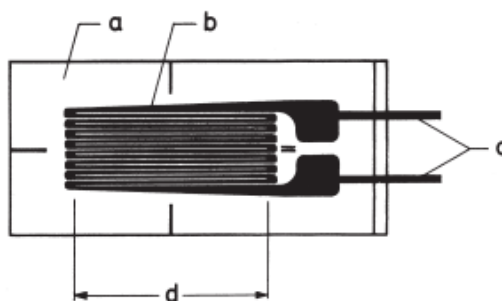


Рисунок 1.4 - Характерна конструкція тензодатчика з витравленою металевим вимірювальною сіткою

a) матеріал-носія

b) вимірювальна сітка

c) з'єднання

d) ефективна довжина сітки

У порівнянні з методами намотаного дроту цей метод значно розширив можливості проектування, оскільки всі форми калібру, які можна представити в одній площині, можна виготовити без додаткових зусиль. Спіральні форми можна легко відтворити, як і цілі мережі, такі як ті, що використовуються в перетворювачах для вимірювання сили, тиску, крутного моменту та інші механічні змінні.

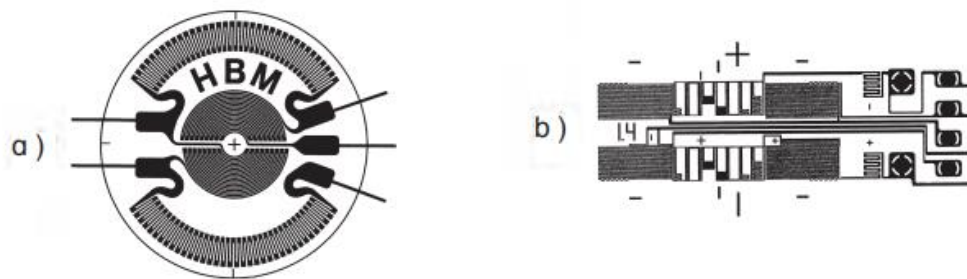


Рисунок 1.5 - Приклади конструкції тензодатчика в технології травлення фольгою: а) розетка діафрагми з чотирьох частин у конфігурації моста для перетворювачів тиску, б) повна схема моста тензодатчика, включаючи всі з'єднання та компенсаційні елементи

Тензодатчики виробляються в безлічі різних типів, забезпечуючи метод, який можна підібрати для різних завдань вимірювання, навіть у складних умовах. Основними сферами застосування тензодатчиків є:

- експериментальний аналіз напруги, включаючи методи вимірювання моделі та біомеханіка
- виробництво перетворювачів.

У той час як адаптованість тензодатчика сприяла його широкому використанню в області експериментального аналізу напруги, саме високий ступінь точності вимірювання, який можна було отримати, зробив тензодатчик привабливим для виробництва перетворювачів. Обидва типи намотаного дроту та фольги виробляють тензорезистори, які відомі як металеві тензодатчики через їхні вимірювальні сітки з металевих сплавів.

1.1.1 Напівпровідникові тензодатчики

Крім металевих тензодатчиків існують інші типи електричних резистивних тензодатчиків. До цієї групи належать напівпровідникові тензодатчики, які розширюють діапазон застосування в тензодатчиках. Принцип вимірювання заснований на напівпровідниковому п'єзорезистивному ефекті, відкритому К. С. Смітом у 1954 році. Спочатку використовувався германій, який пізніше був замінений кремнієм. У будівництві напівпровідникові тензодатчики в основному такі ж, як металеві тензодатчики. Вимірювальний елемент складається зі смужки шириною кілька десятих міліметра і товщиною кілька сотих міліметра, яка закріплена на ізоляційній несучій фользі та забезпечена з'єднувальними проводами. Діодний ефект запобігає використанню тонкого золотого дроту як з'єднання між напівпровідниковим елементом і з'єднувальними смугами.

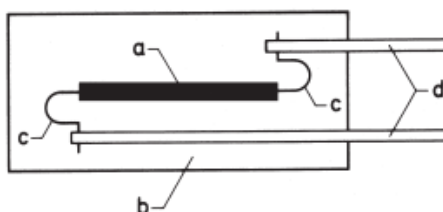


Рисунок 1.6 - Схематичне зображення напівпровідникового тензодатчика

- а) «вимірювальна сітка»
- б) несучий матеріал
- с) проміжний золотий провідник
- д) сполучні планки

Коефіцієнт вимірювання для звичайних напівпровідникових тензодатчиків, тобто співвідношення між виміряною деформацією та сигналом, який видає тензодатчик, приблизно в п'ятдесят-шістдесят разів перевищує коефіцієнт металевих тензодатчиків. Тому вони в основному використовуються у виробництві перетворювачів для вимірювання інших фізичних величин, доповнюючись простими електронними пристроями для формування передавачів. Напівпровідникові тензорезистори не широко використовуються в експериментальному аналізі напруги, і для цього є ряд причин:

- Нелінійні характеристики напівпровідникових тензодатчиків вимагають корекції вимірювань, що вимагає високої точності.
- Напівпровідникові тензодатчики значно дорожчі за металеві.
- Навіть якщо врахувати більшу чутливість, несприятливі впливи, залежні від температури, більш серйозні для напівпровідникових тензодатчиків, ніж для металевих, і ці ефекти важче компенсувати.
- Поводження складніше через крихкість напівпровідника. З іншого боку, висока чутливість є причиною використання напівпровідникових тензодатчиків для вимірювання дуже малих деформацій. Сильний сигнал, який дає цей тип тензорезисторів, має особливу перевагу за наявності сильних полів перешкод. Окрім звичайних тензодатчиків, існують інші типи, які згадуються тут лише для повноти картини й не розглядаються дуже детально.

1.1.2 Тензодатчики з парового напилення (тонкоплівкові)

Третій тип електричних резистивних тензодатчиків забезпечується методами осадження з парової фази. Тут вимірювальний елемент

безпосередньо наноситься на точку вимірювання під вакуумом шляхом випаровування складових сплаву. Сфера застосування обмежена виробництвом перетворювачів [7].

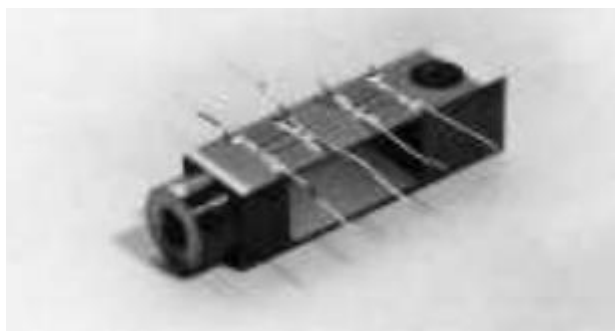


Рисунок 1.7 - Тонкоплівковий тензодатчик на пружинному корпусі перетворювача

Були спроби виробництва тензодатчиків за допомогою методів осадження з парової фази для більш широкого застосування, але без задовільних результатів [8, 9], і спроби були припинені. Інші спроби виготовлення напівпровідникових тензодатчиків, осаджених з газової фази, описані в [10]. Протягом останніх 20 років не спостерігалось жодного помітного зростання визнання на ринку цього типу.

1.1.3 Ємнісні тензодатчики

Ємнісний тензодатчик є новою розробкою, яка в основному розглядається як альтернатива звичайним тензодатчикам для використання при високих температурах за межею металевих тензодатчиків. На даний момент відомі три версії:

- Британська розробка Central Electricity Research Laboratories (C.E.R.L.) спільно з компанією Planer. Тут використовується пластинчастий конденсатор, де розділення пластин змінюється залежно від деформації, яку потрібно виміряти.

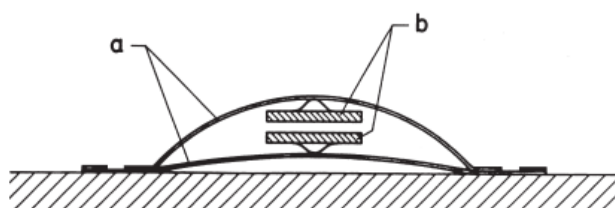


Рисунок 1.8 - Схема емнісного тензодатчика від CERL-Planer. а) каркас з німонового сплаву, б) шари конденсатора на керамічних пластинах

- Американська розробка компанії Boeing Aircraft, яка виконана у вигляді диференціального конденсатора.

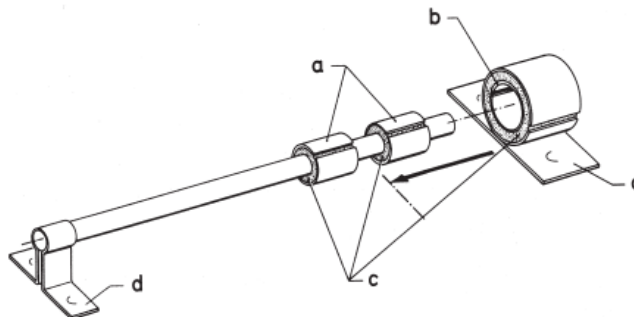


Рисунок 1.9 - Схема емнісного тензодатчика від Boeing. а) внутрішній емнісний шар, б) зовнішній емнісний шар з керамічної ізоляції, д) кріпильні скоби

- Німецька розробка від Інтератома. Це також побудовано як пластинчастий конденсатор. Емнісні перетворювачі закріплюються на досліджуваному об'єкті за допомогою методів точкового зварювання. Хороші результати можна отримати за допомогою емнісних

тензодатчиків в діапазоні температур приблизно до 500°C . Результати все ще придатні для використання в діапазоні до 800°C .

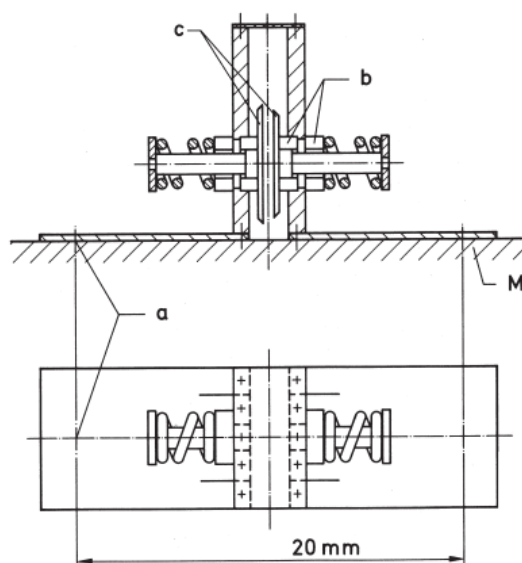


Рисунок 1.10 - Схема ємнісного тензодатчика фірми Інтератом. а) зварні точки кріплення, б) керамічна ізоляція с пластинами конденсатора, М) об'єкт вимірювання

Ємнісні тензодатчики далі тут не обговорюються, оскільки техніка їх вимірювання дещо відрізняється від техніки резистивних тензодатчиків. Зацікавлених просимо звернутися до літератури [11 до 15].

1.1.4 П'єзоелектричні тензодатчики

П'єзоелектричні тензодатчики є активними приладами. Як тензодатчик використовується титанат барію. Як і у випадку з п'єзоелектричними перетворювачами, які використовують кварц як чутливий матеріал, тензодатчик забезпечує електричний заряд на своїх поверхнях, який пропорційний деформації та який можна виміряти за допомогою підсилювачів

заряду. Статичні вимірювання можливі лише за певних умов. П'єзоелектричні тензодатчики отримали лише обмежене визнання і, наскільки відомо автору, здається, повністю зникли з використання.

1.1.5 Фотопружні тензодатчики

Смужка, виготовлена з оптично напруженого активного матеріалу, демонструє ізохроматичне поле в результаті «замороженого», постійно зростаючого напруження. Ізохромати зміщуються в результаті деформації. Ступінь зміщення, який зчитується зі шкали, є мірою деформації. Тензодатчики цього типу виробляються в США. Вони не досягли практичного значення і більше не доступні для продажу.

1.1.6 Механічні тензодатчики

Ці пристрої зустрічаються порівняно рідко, але вони мають давню традицію. Через свою конструкцію їх зазвичай можна застосовувати лише до великих об'єктів. Ефект вимірювання демонструється слідом, подряпанним на металевій пластині або скляному циліндрі, який, однак, можна оцінити лише в кінці тесту під мікроскопом. Цей недолік дещо компенсується великим діапазоном температур. Записані вимірювання все ще можна прочитати, наприклад, якщо перетворювач загорівся після аварії.

1.1.7 Інші тензодатчики

Численні інші пристрої доступні під назвою «датчик деформації». Тензорезистивні датчики на основі резистивних систем, індуктивних систем (типи диференціальної індуктивності та диференціального трансформатора) і методу вібраційного дроту належать до цієї групи, яка також включає кілька пристроїв, що працюють на оптичних і механічних принципах. У більшості випадків сигнал, який подають ці пристрої, не пропорційний деформації, тобто відносній зміні довжини, а пропорційний абсолютній зміні довжини. Деформацію необхідно розрахувати шляхом ділення результату вимірювання на базову довжину. Ці пристрої не є тензодатчиками, тому тут не розглядаються.

1.2 Принцип роботи тензодатчика

Вимірювання деформації за допомогою тензодатчиків передбачає, що напруга досліджуваного об'єкта без втрат передається на тензодатчик. Це вимагає тісного зв'язку між тензодатчиком і об'єктом. Майже у всіх випадках лише відкрита поверхня об'єкта вимірювання доступна для вимірювання, хоча це може бути як у внутрішній порожнині, так і на зовнішній стороні об'єкта. Дуже тісний зв'язок, необхідний між об'єктом вимірювання та тензодатчиком, найкраще забезпечується клеєм. Внутрішні вимірювання на об'єкті, тобто вимірювання в межах маси самого об'єкта, можливі лише за допомогою тензодатчиків за особливих умов. Це може статися, наприклад, під час використання пластикових вимірювальних об'єктів у техніках моделювання, коли тензодатчик формується під час виготовлення деталі або з бетонними

конструкціями, де тензодатчик може бути вбудований у бетон під час заливки. В останньому випадку необхідні інкапсульовані перетворювачі деформації. Інші матеріали та методи склеювання в основному обмежені спеціальними застосуваннями, наприклад, склеювання кераміки для високотемпературних діапазонів і точкове зварювання для сталевих конструкцій тощо. Обидва ці процеси вимагають спеціальних тензодатчиків [12]. З електрично резистивними тензодатчиками, які є єдиним типом, який тут розглядається, напруга, що передається на тензодатчик від об'єкта вимірювання, викликає зміну його електричного опору. Принцип роботи заснований на двох різних фізичних процесах, які коротко пояснюються нижче.

1.2.1 Металеві тензодатчики

Принцип роботи металевого тензодатчика базується на залежності деформація/опір електричних провідників, яку відкрили Вітстон і Томсон (дивитись розділ 1.1). Будь-який електричний провідник змінює свій опір під дією механічного впливу, наприклад через сили розтягу або стиснення. Зміна опору частково зумовлена деформацією провідника, а частково — зміною питомого опору Q матеріалу провідника в результаті мікроструктурних змін. Цей процес описується відношенням

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (1.1)$$

R = електричний опір

ε = деформація

ν = коефіцієнт Пуасона

Q = питомий опір

Діаграма на рисунку 1.11 є витягом із цієї публікації, цифри, позначені кривими, позначають нахил S , який є часткою відносної зміни опору $\Delta R/R_0$ і деформації ϵ :

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta I/I} = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} \quad (1.2)$$

Вимірювання проводили на вільно натягнутих дротах.

В формулі виділено дві характеристики:

1. Є значні відмінності в початкових нахилах кривих. Вони простягаються від +6,5 для платини-іридію 95/5 до -10 для нікелю. Ці відмінності можна пояснити помітними варіаціями зміни опору внаслідок мікроструктури.

2. При певних рівнях деформації змінюються нахили тих кривих, початковий нахил яких відхиляється від значення 2. Ця зміна відбувається для різних рівнів деформації і завжди при переході від стану пружної деформації до стану пластичної. Якщо припустити, що в області пластичної деформації коефіцієнт Пуассона має значення $\nu = 0,5$ при постійному об'ємі, то лише з геометричної частини рівняння (1.1)

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon(1 + 2\nu) = \epsilon(1 + 2 * 0.5) = 2\epsilon \quad (1.3)$$

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta I/I} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m} \quad (1.4)$$

Мікроструктурна частина стає нульовою. Тому особливо привабливими є матеріали з початковим характерним нахилом і які зберігають цю фігуру протягом усієї пружної області. Це зустрічається з деякими сплави, тому вони є кращими для виробництва тензодатчиків.

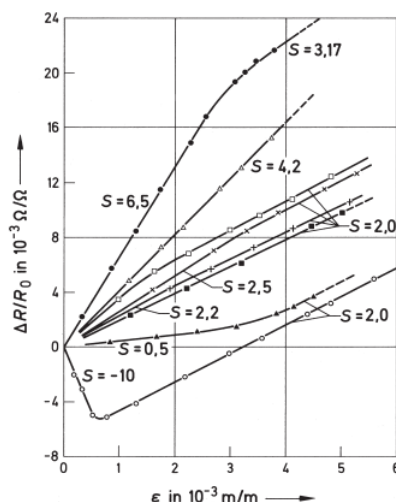


Рисунок 1.11 - Характеристики опору/деформації вільно натягнутих проводів

1.2.2 Напівпровідникові тензодатчики

Як і у випадку з металевими тензодатчиками, вимірювальний ефект напівпровідникових тензорезисторів базується на зміні електричного опору, але на відміну від металевих тензодатчиків співвідношення деформація/опір здебільшого зумовлено зміною рухливості електронів. Однак геометрична частина зміни опору невелика і становить менше 2%. В даний час для виготовлення напівпровідникових тензодатчиків використовується тільки кремній, і монокристал витягується з цього матеріалу за допомогою процесу Чохральського [18]. Щоб досягти необхідної чистоти, будь-які атоми домішок,

які все ще залишаються, екстрагуються за допомогою процесу зонного очищення, поки не буде досягнуто чистоти приблизно 1 атом домішки на 1010) атомів кремнію. Потім шляхом дифузії до кристалічної решітки додаються певні домішкові атоми. Цей процес відомий як «допінг». Тривалентні атоми, акцептори, використовуються для легування чотиривалентного кремнію, напр. бору або галію, що забезпечує р-провідність через виснаження електронів. Якщо використовуються атоми з валентністю п'ять, напр. донорів, таких як фосфор або миш'як, тоді виникає надлишок електронів і виходить n-провідність. Ступінь легування визначає електропровідність. Особливістю монокристалів, отриманих таким чином, є те, що їх електричний опір змінюється під впливом деформації, а сила цього ефекту змінюється по трьох осях кристалічної решітки. Ефект анізотропний. Для позитивної деформації в р-кремнії позитивна зміна опору відбувається на осі $\langle 111 \rangle$, а для n-кремнію відбувається негативна зміна на осі $\langle 100 \rangle$. При негативному напруженні ефект зворотний. У той час як ефекти досить помітні в щойно згаданих напрямках, вони набагато слабші в інших осьових напрямках.

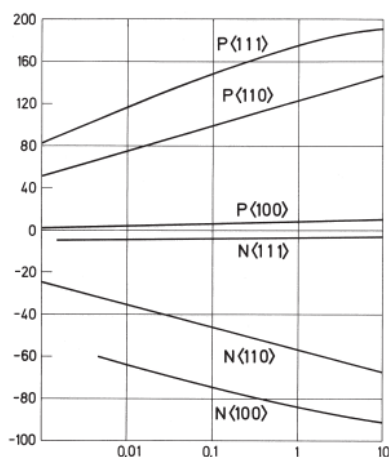


Рисунок 1.12 - Коефіцієнт вимірювання для монокристалічного кремнію р та n у трьох осях кристалічної решітки у зв'язку з провідністю

З рисунка 1.12 видно, що калібрувальний коефіцієнт, зміна опору по відношенню до деформації, залежить від провідності кремнію і, отже, від ступеня легування. Для виготовлення тензодатчиків монокристал легують у вигляді смужок, поздовжній напрямком яких відповідає осі решітки з найбільшим коефіцієнтом калібрування.

Напівпровідникові тензодатчики підкоряються співвідношенню

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \left(\frac{T_0}{T} + C \epsilon^2 \left(\frac{T_0}{T} \right)^3 \right) \quad (1.5)$$

Параметри k , T_0 і C визначають характеристику.

1.3 Система вимірювання зміни опору тензодатчика

Деформації, виміряні тензодатчиками, зазвичай дуже малі. Отже, зміни опору також дуже малі і не можуть бути виміряні безпосередньо, скажімо, за допомогою омметра. Тому тензодатчик повинен бути включений до вимірювальної системи, де можливе точне визначення зміни опору тензодатчика.

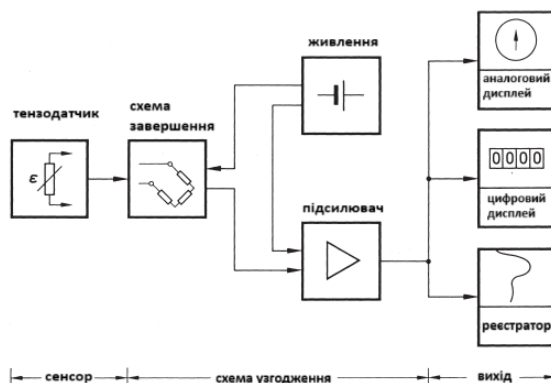


Рисунок 1.13 - Схема вимірювальної системи для вимірювання деформацій за допомогою тензодатчика

Перший компонент у системі утворений самим тензодатчиком. Він перетворює механічне напруження в зміну електричного опору. Другим компонентом у системі є вимірювальна схема, показана тут як міст Уітстона з тензодатчиком як одним плечем. Як тензодатчик, так і вимірювальний контур у фізичному сенсі є пасивними компонентами. Для отримання корисного сигналу їм необхідно передати енергію. Ця допоміжна енергія береться з окремого джерела. Зазвичай використовується постійна електрична напруга, але також можна використовувати постійний струм. Коли опір тензодатчика змінюється через деформацію, мостова схема втрачає свою симетрію та стає незбалансованою [20]. Отримано вихідну напругу моста, пропорційну дисбалансу моста. Підсилювач входить до складу вимірювальної системи як третій компонент, який підсилює вихідну напругу моста до рівня, придатного для індикації приладів. Іноді підсилювачі створюють так, щоб видавати вихідний струм, пропорційний вихідній напрузі моста, але деякі моделі можуть забезпечувати вихід напруги або струму. У лінійного підсилювача вихідна напруга або вихідний струм пропорційні вхідній напрузі підсилювача, яка також є вихідною напругою моста, а це, у свою чергу, пропорційне виміряній деформації. Четвертим компонентом вимірювальної системи є дисплей. Він перетворює вихідний сигнал підсилювача у форму, яку може спостерігати людина. У найпростішому випадку вимірювання відображається за допомогою показної шкали вольтметра чи амперметра або цифрами на цифровому вимірювальному приладі. Якщо необхідна зміна деформації з часом, як у динамічному процесі, реєструючі прилади підходять краще, ніж чисто індикаційні. Багато підсилювачів дозволяють підключати обидва типи приладів як альтернативу, так і паралельно, як показано на рисунку 1.13.

Наведений вище опис вимірювальної системи лише окреслює основні елементи. На практиці система часто розширюється за рахунок використання додаткового обладнання, напр. сканери, фільтри, накопичувачі пікових значень, кінцеві вимикачі, реєстратори перехідних процесів тощо. Електронні системи обробки даних також можуть бути підключені до системи замість індикаційних приладів, що значно підвищує універсальність.

1.4 Критерії вибору тензодатчиків

Питання, які слід розглянути під час вибору типу тензодатчика з асортименту, доступного від виробників, виникають через різноманітність застосувань тензодатчиків і через умови, що впливають на тензодатчики під час експлуатації. Не існує тензодатчика, який би відповідав усім вимогам. З цієї причини доступна велика кількість різних тензодатчиків, які за потреби доповнюються спеціальними типами. Питання бізнес-стратегії виробника полягає в тому, чи підтримує він асортимент, який утримується в межах, чи дозволяє йому розростатися до величезних розмірів. Більшість проблем можна вирішити за допомогою ретельно продуманого діапазону визначених обмежень без необхідності вдаватися до спеціального виробництва. Тоді вибір буде легшим для користувача. Це особливо важливо для користувачів із середнім чи невеликим досвідом. Було показано, що половину всіх задач вимірювання можна вирішити за допомогою колекції з близько двох десятків типів тензодатчиків. З наведеного нижче повинно бути можливим вибрати відповідний тип тензодатчика за допомогою логічної процедури. Можливо, однак, що можуть виникнути суперечливі аргументи, які змусять піти на компроміс, але це поширене явище в техніці і не обмежується методами

тензодатчиків. Автор виявив, що користувач дуже часто має лише розпливчасте враження про те, що відбувається в точці вимірювання. Трохи більше роздумів перед початком вимірювання може допомогти запобігти дорогим помилкам і може привести до кращих результатів. Представлена тут система вибору вимагає від користувача аналізу своєї проблеми вимірювання. Для використання системи необхідно виконати дві вимоги:

1-ша вимога: завдання вимірювання має мати чітку мету, а також повинні бути відомі деталі процесу та його граничні умови.

2-а вимога: характеристики тензодатчика повинні бути відомі.

Таблиця 1.1 призначена для надання допомоги у виконанні першої вимоги. Тут найважливіші фактори, що впливають на вибір типу тензодатчика, перераховані як заголовки в п'яти групах. Таблицю можна використовувати як контрольний список, щоб користувач не пропустив важливий момент.

Таблиця 1.1 - Схема для аналізу умов, яким повинна відповідати точка вимірювання тензодатчика

№	Назва проблеми	Опис проблеми
1	Проблема вимірювання	Первинна: вимірювання деформації Вторинна: експериментальний аналіз - конструкція перетворювача - моніторинг установки - системи безпеки.

Продовження таблиці 1.1

2	Механічні умови в точці вимірювання	Стан напруги одноосьовий - двоосьовий - головний напрямок відомий – невідомий. Топографія поля напруг однорідна - неоднорідна - круті коливання (напруга навколо вирізів) визначення середнього або максимального значення. Тип навантаження статичні: амплітуда - напрям (позитивне, негативне) - кількість навантажень; динамічний: імпульсний - стохастичний - циклічний - змінне навантаження - навантаження розширення (позитивне, негативне) - амплітуда - кількість циклів навантаження - вимірювання віднесені до нуля - віднесені до ненульового значення. Співвідношення корисної частини вимірювання до частини збурення.
---	---	---

Продовження таблиці 1.1

3	Екологічні умови	Тривалість вимірювання лише один раз - короткочасний - повторюваний короткочасний - тривалий термін - необхідна тривалість роботи - необхідний термін служби системи зв'язування. Рівень температури - діапазон (до, під час і між вимірюваннями) - швидкість зміни - одностороннє випромінювання - коефіцієнт теплового розширення матеріалу компонента. Інтенсивність впливу завад - ефективна тривалість. Вологість - вода - вода під тиском - пар – лід. Масло (трансформаторне масло, парафін, машинне масло, гідравлічне масло). Хімічні речовини (тверді, рідкі, газоподібні, реактивні, інертні). Тиск – вакуум.
---	------------------	--

Продовження таблиці 1.1

4	Електричні умови в точці вимірювання	Схема вимірювання: Четверть мостова, трипровідна схема, напівмостова, подвійна чверть мостова, повний міст. Живлення тензодатчика: Постійна напруга, змінна напруга (несуча частота), напруга відносно землі, безперервне/імпульсне живлення (співвідношення часу і заповнення). Довжина кабелю, опір, ізоляція, ємність, стійкість до впливу зовнішнього середовища (механічного, термічного, хімічного), з'єднувальні елементи (вилки, кабельний вхід).
5	Умови застосування	Оброблюваність матеріалу компонента, властивості склеювання та зварювання. Доступ до застосування, використання піскоструминної обробки або іншої обробки поверхні, стійкість до розчинників і температури.

Якщо якомога більше відомо про умови, що впливають на вимірювання, тоді необхідні витрати та зусилля можна легше оцінити, а шанси на успіх

також вищі. Непередбачувані результати неможливо повністю усунути, але їх можна звести до мінімуму. Знання характеристик тензодатчика необхідно для виконання 2-ї вимоги для вибору оптимального калібру. Визначення параметрів тензорезистора не завжди проводиться одним і тим же методом, тому результати можуть бути інтерпретовані по-різному. Метою Директиви 2635, яке було підготовлено та опубліковано VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Regelungstechnik, було полегшити цю ситуацію та заохотити універсальний метод вимірювання. Оскільки вплив перешкод не виникає одночасно, не потрібно оцінювати всі характеристики, а лише ті, що стосуються умов застосування. Це також стосується методу склеювання та покриття, що використовується для захисту точки вимірювання від несприятливих механічних або хімічних впливів.

1.4.1 Область застосування

В принципі, всі тензодатчики можуть бути використані як для вирішення завдань експериментального аналізу напруг, так і для конструювання перетворювачів. Проте існують певні відмінності між типами тензодатчиків, що робить їх придатними для певних застосувань.

1.5 Висновки до розділу

Проведено аналіз літературних джерел, проаналізовано типи та види тензодатчиків. Проаналізовано принципи роботи тензодатчиків та умови їх експлуатації. Наведено приклади розрахунку, виготовлення та області застосування тензодатчиків.

2 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

2.1 Види тензометричних перетворювачів

Завдяки своїм унікальним експлуатаційним характеристикам тензодатчик опору легко домінував у галузі перетворювачів протягом останніх двадцяти років або близько того. Довідкова інформація. Загалом, перетворювач — це пристрій, який перетворює один тип енергії в інший. Таким чином, акумулятор є перетворювачем (хімічна енергія перетворюється на електричну), як і звичайний скляний термометр (теплова енергія перетворюється на механічне зміщення стовпа рідини). Тут ми маємо на увазі певний клас перетворювачів: пристрої, які перетворюють вхідну механічну енергію в еквівалентні електричні сигнали для вимірювання та/або керування вхідними явищами. Цей тип електромеханічного перетворювача зазвичай розташований біля джерела фізичної сили або енергії та реагує на її величину. Прилади для зчитування або контролю можна розташувати на будь-якій зручній відстані від перетворювача та підключити до нього електричним кабелем.

Загальні приклади таких перетворювачів використовуються для вимірювання тиску рідини, ваги, прискорення, переміщення, крутного моменту тощо. Слово «комірка» часто використовується для зручності опису компактного перетворювача (тобто тензодатчика, датчика тиску). Певні форми перетворювачів мають власні назви, які зазвичай походять від фізичних явищ, які вони вимірюють. Приклади включають акселерометри, екстензометри та віброметри.

2.1.2 Конструкція тензометричного перетворювача

У конструкції перетворювача така велика кількість типів не потрібна. Натомість до точності вимірювань висуваються вищі вимоги. Тензодатчики, які також задовольняють надзвичайні вимоги до точності для каліброваних тензодатчиків, належать до того ж типу, що й тензодатчики серії «G». Носій для вимірювальної решітки складається з фенолу, армованого скловолокном смола. Також можуть бути виготовлені спеціальні типи тензодатчиків, якщо попит досить високий. Потім потрібні переговори з виробником. Серія «G» була розроблена спеціально для використання в конструкціях перетворювачів. Спеціалізований публікація надає детальну інформацію про їхні характеристики та застосування. Якщо є достатня вимога, НВМ також постачає спеціальні типи, які є оптимальними призначені для певних завдань. В наявності найсучасніше обладнання для виготовлення негативів. Це дозволяє повністю використовувати різноманітний дизайн представлені варіанти техніки фототравлення для виготовлення фольгованих тензодатчиків. Однак користувача не повинен вводити в оману використання спеціального тензодатчика без потреби зроблено, оскільки це спростовує згаданий раніше факт, що в більшості випадків невеликий діапазон типів тензодатчиків достатньо. Спеціальні тензодатчики слід застосовувати лише за певних умов необхідні функції або якщо мають бути виконані певні умови. У цих випадках найкраще зробіть запит, вказавши точні деталі заявки. Іноді може бути відповідна форма знайдено з ряду існуючих спеціальних негативів.

2.2 Види тензодатчиків

Тензодатчики доступні в різних формах і розмірах. Окрім різної довжини вимірювальної сітки, існують різні конструкції та положення для з'єднань. Існує також різниця між лінійними тензодатчиками в одинарному та подвійному (паралельному) розташуваннях, Х-розетками з осями вимірювальної сітки, розташованими під кутом 90° одна до одної, R-розетками з 3 осями вимірювальної сітки, розташованими під певними кутами одна до одної, ланцюжками тензодатчиків і численні інші спеціальні форми. Велика кількість форм і розмірів є результатом адаптації до різних завдань застосування.

Рисунок 2.1 є схематичним зображенням вибору тензодатчиків різної довжини. Деякі також мають різні зв'язки.

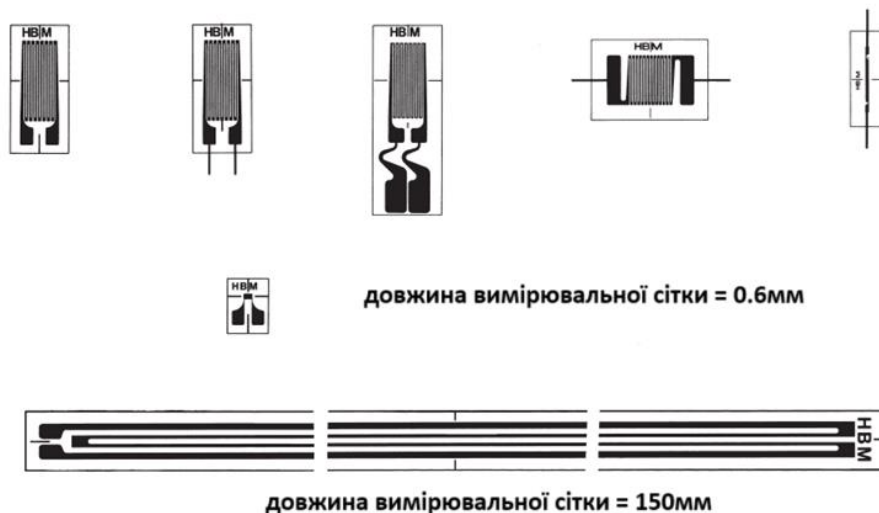


Рисунок 2.1 - Типові форми вимірювальної сітки для лінійних тензодатчиків

2.2.1 Однорідне поле деформації

Першим критерієм є вільний простір на об'єкті вимірювання. Якщо об'єкт досить великий, тензодатчики з довжиною вимірювальної сітки від 3 до 6 мм є оптимальними як з точки зору якості, так і з точки зору простоти їх застосування. Розташування з'єднань збоку від вимірювальної сітки та надзвичайно вузька конструкція сітки враховують обмеження простору в точці з'єднання. Думка, що часто зустрічається, що чутливість тензодатчика залежить від його довжини, є невірною. Чутливість металевого тензодатчика пропорційна відносному подовженню, тобто деформації, а не абсолютному видовженню. У цьому відношенні абсолютна довжина тензодатчика не впливає на його чутливість. Однак надзвичайно малі тензодатчики слід використовувати лише там, де це необхідно з технічних причин, напр. для дослідження напружень у надрізах. Тоді краще розглянути можливість вирізання великого тензодатчика, щоб адаптувати його до наявного простору. Це, природно, призводить до питання, чи можна відрізати частину тензодатчика. Відповідь «так», але треба знати куди, а також знати про можливі наслідки. Тут необхідний короткий експрес у механіку передачі напруги на вимірювальну сітку тензодатчика.

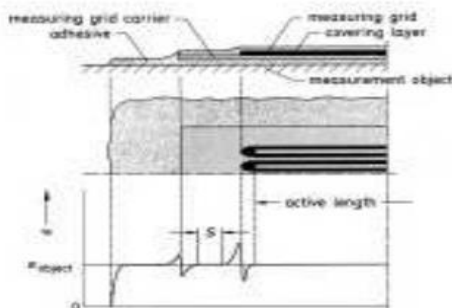


Рисунок 2.2 - Схематичне зображення передачі напруги на вимірювальну сітку тензодатчика

Передбачається, що об'єкт вимірювання рівномірно напружений величиною ϵ_{object} . Ця напруга повинна передаватися через клейовий шар і носій вимірювальної сітки на саму вимірювальну сітку. Для об'єктів вимірювання, які не надто тонкі, сили, необхідні для цього, є незначними порівняно з силами, що діють на об'єкт. Перехідні секції існують для передачі деформації в об'єкті вимірювання через окремі з'єднувальні шари до вимірювальної сітки тензодатчика[14]. На стику одного шару з наступним виникає перехідна ділянка, тобто:

- від об'єкта вимірювання до клейового шару
- від клейового шару до носія вимірювальної сітки
- від носія вимірювальної сітки до вимірювальної сітки.

Довжина перехідної ділянки залежить від товщини окремих шарів і від жорсткості, тобто модуля Юнга, матеріалів шару. Діаграма показує перехідну фазу ділянки, де деформація в об'єкті вимірювання дорівнює частковій деформації в частинах тензодатчика. У кожній точці переходу від однієї частини тензодатчика до наступної відбувається збільшення деформації, яка компенсує слабину в наступній частині. Носій вимірювальної сітки за необхідності можна вкоротити на величину, позначену літерою «S» на схемі, не впливаючи на характеристики тензодатчика. Якщо її вкоротити далі, то перехідна ділянка деформації розтягнеться в область «активної» довжини сітки. Це призводить до очевидного зниження чутливості до деформації, яка виражається коефіцієнтом вимірювання. Цей ефект лише незначний для тензорезисторів з довгою вимірювальною сіткою, але для дуже коротких тензодатчиків може статися зниження чутливості на кілька відсотків. Якщо перехідні ділянки деформації носія вимірювальної сітки занадто скорочені, це також може негативно вплинути на повзучість тензодатчика. Модуль Юнга залежить від температури для синтетики, включаючи клеї та матеріали-носії

сітки. Це означає, що при вищих температурах перехідні ділянки стають довгими і навпаки. Цей факт слід враховувати там, де це можливо. Мінімальна відстань від 1 до 2 мм має виходити за межі вимірювальної сітки.

Розрізання тензодатчика паралельно напрямку вимірювання має дуже незначний вплив на поперечну чутливість тензодатчика. Оскільки поперечна чутливість сучасних тензодатчиків у будь-якому випадку дуже мала, цим ефектом можна знехтувати, а носій тензодатчика обрізати майже до краю вимірювальної сітки.

2.2.2 Неоднорідне поле деформацій

Тензодатчик формує середнє арифметичне умов деформації, що існують під його вимірювальною сіткою. Цей факт враховується при розгляді найбільш прийнятної довжини вимірювальної сітки. Якщо потрібне середнє значення, то використовується довга вимірювальна сітка. Ось типовий приклад вимірювань на бетоні. За допомогою коротких тензодатчиків будуть отримані часткові деформації, які будуть меншими за середнє значення в області заповнювача та більшими за це значення в області цементної суміші.

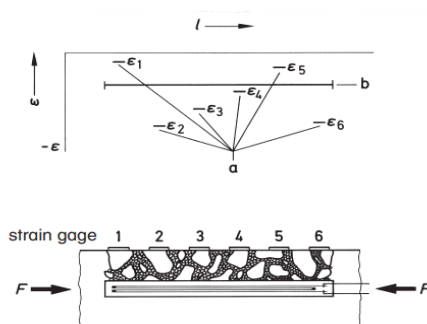


Рисунок 2.3 - Приклад застосування тензодатчика з довгою вимірювальною сіткою, що дає середнє значення з неоднорідним матеріалом, наприклад бетон

- а) точкові значення, виміряні короткими тензодатчиками
- б) в середнє значення, виміряні довгим тензодатчиком.

Співвідношення між мінімальними та максимальними значеннями деформації може бути від 1:3 до 1:15 для бетону, залежно від заповнювача. Адекватне усереднене значення отримують, коли довжина вимірювальної сітки принаймні вчетверо, а краще в п'ять разів перевищує найбільший розмір ядра сукупності. Діаграма на рис. 1 показує очікувану похибку вимірювання відносно співвідношення довжини тензодатчика/розміру частинок. Протилежне діє, якщо пікове значення або умова локальної деформації потрібні в неоднорідному полі напруги, напр. максимальне значення напруги в надрізі. Короткі тензодатчики тут є перевагою, оскільки довгий тензодатчик дасть небажане середнє значення. Взаємозалежність між вимірним значенням і довжиною вимірювальної сітки схематично показано на рисунку 2.5. Крива повинна показувати фактичну зміну деформації вздовж зразка з надрізом. Значення ординат $l_1...l_4$ показують вимірювання, які отримані, якщо вимірювальна сітка застосованого тензодатчика має відповідні довжини $l_1...l_4$. Пікове значення правильно отримується лише за допомогою короткого тензодатчика довжиною l_4 .

Виходячи з цього, можна припустити, що довжина вимірювальної сітки, що дорівнює нулю, була б ідеальною, але, звичайно, повинні бути встановлені обмеження. Технічно цілком можливо виготовити тензодатчики з довжиною сітки 0,2 мм. Чим коротша вимірювальна сітка, тим важливіші проблеми передачі напруги на вимірювальну сітку.

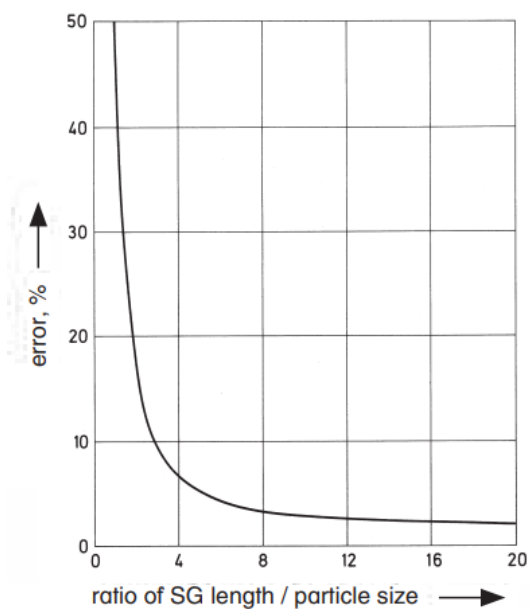


Рисунок 2.4 - Похибка вимірювання при вимірюванні неоднорідних матеріалів, напр. бетон, залежно від співвідношення довжина тензодатчика/розмір частинок

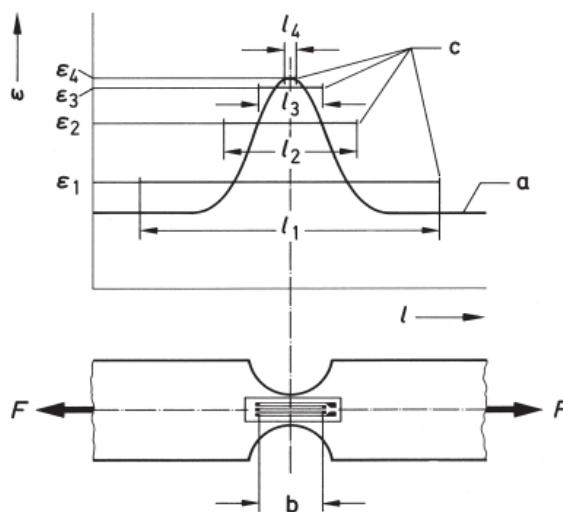


Рисунок 2.5 - Вплив довжини вимірювальної сітки l на вимірювання внаслідок усереднення при вимірюванні піків напруги

- a) фактична зміна деформації вздовж центральної осі стрижня з насічкою під час розтягу
- b) b активна довжина вимірювальної сітки $l_1 \dots l_i$
- c) c значення деформації, виміряної тензодатчиком довжини l_i

Ці проблеми виникають переважно під час прикріплення тензодатчика до об'єкта. Це особливо складно в надрізах і призводить до великих похибок вимірювань. Слід також звернути увагу на той факт, що при малих площах вимірювальної сітки розсіювання тепла через об'єкт вимірювання є дуже низьким. Це означає, що струм живлення, який викликає нагрівання внаслідок ефекту Джоуля, повинен бути мінімальним і враховуватися під час вибору та налаштування джерела живлення. Тому тензодатчик повинен бути не коротшим, ніж необхідно. Як приблизний орієнтир, довжина вимірювальної сітки дорівнює $\frac{1}{2}$ радіуса надрізу.

2.2.3 Динамічні умови деформації

Тензодатчики також добре підходять для вимірювання умов динамічної деформації. Якщо це деформації, що змінюються в часі, однак однакові по довжині вимірювальної ділянки, застосовуються для вибору тензодатчика. При ударних або високочастотних коливальних процесах слід звернути увагу на довжину вимірювальної сітки.

2.3 Тензорезистивні ланцюги для визначення градієнтів напружень

У підрозділі про напруги в надрізах було пояснено вплив довжини вимірювальної сітки на результат вимірювання. На практиці співвідношення часто не так чітко видно, і точку максимального навантаження неможливо точно визначити. Можливо, потрібно не тільки пікове значення, а й зміна навантаження на певній ділянці або зміщення пікового значення під впливом змінної точки навантаження. Для вирішення таких завдань були розроблені тензорезисторні ланцюги [22]. Ланцюги тензодатчиків являють собою комбінацію вимірювальних решіток, які є одного типу або чергуються через регулярні проміжки часу, але всі вони знаходяться на одному спільному носії. Деякі з найважливіших типів показані на рисунку 2.6. Кожен ланцюжок містить 10 індивідуальних вимірювальних сіток або 5 груп по 3 вимірювальні сітки кожна. На кінці кожного ланцюга розташована додаткова сітка, яку можна накласти окремо на відповідну точку та використовувати як компенсаційний або додатковий тензодатчик.

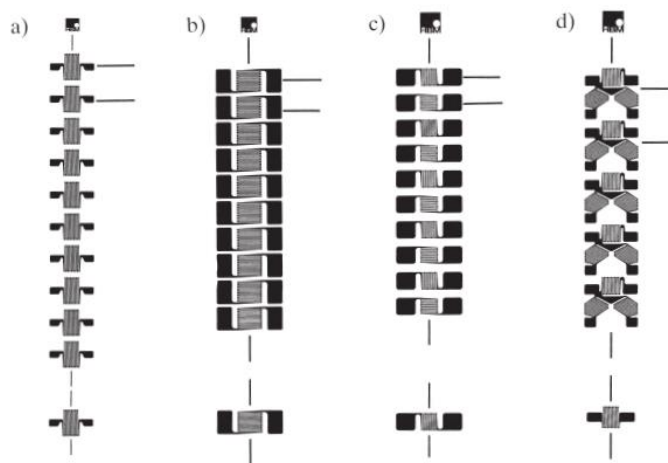


Рисунок 2.6 - Форми ланцюгів тензодатчиків

а) вимірювальні сітки в напрямку, паралельному поздовжній осі ланцюга, б) вимірювальні сітки в напрямку, перпендикулярному до поздовжньої осі ланцюга, с) вимірювальні сітки в напрямку, попеременно паралельному та перпендикулярному до поздовжньої осі ланцюга, d) вимірювання сітки в групах по 3 під кутом $0^{\circ}/60^{\circ}/120^{\circ}$ до поздовжньої осі ланцюга (розетковий ланцюг).

Ланцюги тензодатчиків виготовляються різних розмірів. Розмір Р, крок, визначає відстань між центральними осями двох сусідніх вимірювальних сіток; з ланцюгом розетки це відстань між двома групами сіток. Ланцюги типу а) і б) виготовляються з кроком 1 мм, 2 мм і 4 мм, типу с) 2 мм і 4 мм, а розетковий ланцюг d) виготовляється з кроком 4 мм. На рисунку 2.7 наведено приклад застосування ланцюгів тензорезисторів для визначення розподілу напружень в заокругленому перерізі в корені зуба зубчастого колеса. Тут вимірювали дотичну та поперечну деформації за допомогою 5 ланцюжків у 50 точках на корені зуба.

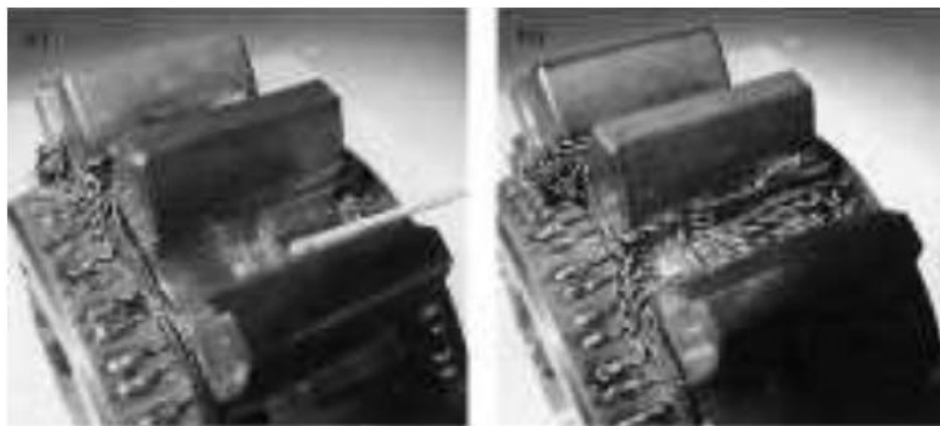


Рисунок 2.7 - Вимірювання деформацій ланцюгами тензодатчиків у корені зуба зубчастого колеса, від 3-4. а) встановлений тензодатчик із сірником для порівняння розміру, б) завершене встановлення датчика, готове до вимірювання

На зображенні нижче показано з'єднаний ланцюг тензодатчика та сірник для порівняння розміру; на зображенні праворуч показано готову точку вимірювання з дротом. Дотичні напруги, виявлені на випробувальному зубчастому колесі, показані на діаграмі на рисунку 2.8 (ліворуч: напруги стиснення, праворуч: напруги розтягування) у трьох різних точках навантаження. Випробування були проведені Дослідницьким закладом для зубчастих коліс і трансмісійних приводів Технічного університету в Мюнхені. З цього прикладу положення максимуму стрес не був передбачуваним; крім того, певна міра залежності від точки завантаження можна розпізнати. Цей тип проблеми вимірювання можна задовільно вирішити лише за допомогою тензодатчиків.

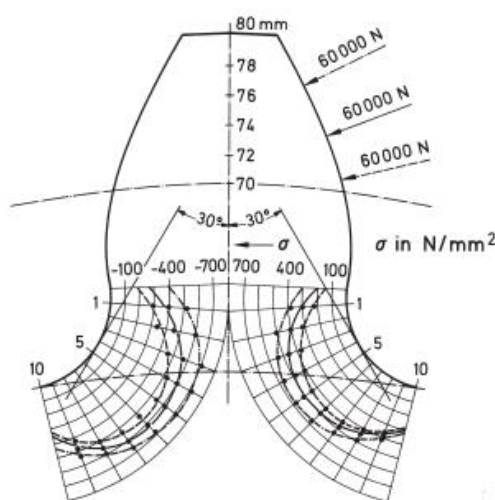


Рисунок 2.8 - Дотичні напруги в заокругленій ділянці кореня зуба зубчастого колеса

2.4 Розетки тензодатчиків для визначення стану напружень

Позначення «розетка» походить від оригінальної форми декількох тензорезисторів, які мали кілька перехрещених вимірювальних сіток у формі зірки на спільному носії; тепер він використовується для опису всіх інших множинних тензодатчиків із перехресними осями сітки. Перехресне розташування вимірювальних сіток спочатку було необхідним через велику довжину сітки; вони також іноді використовуються. Сучасні технології виробництва, зокрема ті, що включають техніку травлення фольги, дають форми розетки з вимірювальними сітками, розташованими близько одна до одної, дивитись рисунок 2.9. Обидва види мають свої переваги та недоліки.

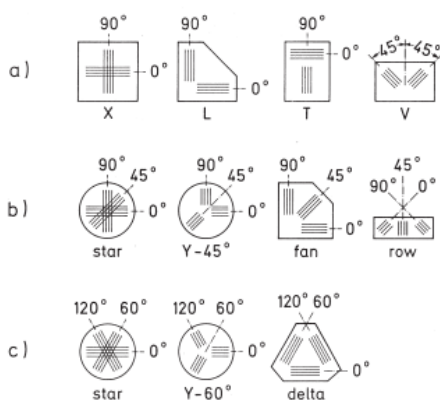


Рисунок 2.9 - Розетки тензодатчиків

а) Розетки X із схрещеними осями під кутом 90° . Для застосувань, що включають умови двовісного напруження з відомими головними напрямками, б) R-розетки з перехрещеними осями під кутом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ (також називаються прямокутними розетками), с) R-розетки з перехрещеними осями під кутом

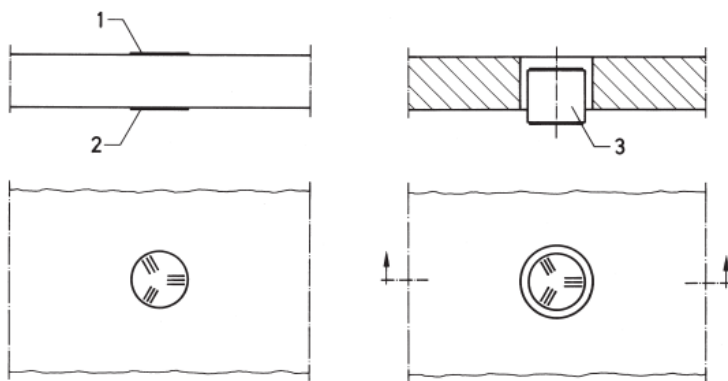
$0^\circ/60^\circ/120^\circ$ (також називаються дельта-розетками), b) і c) використовуються в додатках із двовісним умови напруги з невідомими головними напрямками.

За допомогою розеток у формі зірки або хреста вимірювальні решітки розташовані одна над одною. Це має перевагу в тому, що компоненти деформації можна вимірювати близько один до одного в одному місці. Однак є недоліки через різну відстань вимірювальних сіток від поверхні об'єкта вимірювання. Це особливо помітно, коли напруження згину присутні на тонких предметах або на вигнутих поверхнях. Високу жорсткість деформації (пружність) через більш товсте нарощування форм розетки необхідно враховувати щодо посилення деформації для тонких об'єктів, а також для матеріалів, переважно синтетичних, з низьким модулем Юнга. Накопичення тепла в результаті несприятливого розсіювання тепла у верхній і центральній вимірювальних решітках можна компенсувати за допомогою зниження напруги живлення. У цьому відношенні кращими є розеткові форми з вимірювальними сітками, розташованими близько одна до одної на одній площині. Однак велика необхідна площа може призвести до проблем із малими об'єктами вимірювання або крутими градієнтами напруги в області розетки. Тому розетки виготовляються різних форм і розмірів. Для розеток з 2 вимірювальними сітками, осі яких перетинаються під кутом 90° , використовується літера «X». Буква X також використовується як ідентифікаційний символ для перехрещених осей вимірювальної сітки, навіть якщо вони утворюють форму T, L або V. В аналізі напруг X-розетки використовуються для дослідження двовісних напружень із відомими головними напрямками. Вони використовуються для отримання позитивних і негативних деформацій для кумулятивного розрахунку при проектуванні простих перетворювачів і у відповідних застосуваннях, наприклад. моніторинг машини. Кодування розеток з трьома вимірювальними сітками — літера «R».

Є дві основні форми, які відрізняються кутовим інтервалом між їхніми вимірювальними сітками: $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ та $0^\circ/60^\circ/120^\circ$. Кутові значення завжди відносяться до напрямків вимірювальної сітки, незалежно від того, чи розташовані сітки у вигляді зірки, Y, дельти, віяла чи іншої форми. Розетки R використовуються для аналізу двовісних напружень, де основні напрямки невідомі як якісно, так і кількісно.

2.4.1 Розетки тензодатчиків для дослідження залишкових напруг

Метод вимірювання залишкової напруги в деталях конструкції найкраще пояснити на прикладі. Плиту перевіряють на стан залишкової напруги, рисунок 2.10. Можуть бути залучені одноосьові або двовісні нормальні напруги з невідомими головними напрямками, а також можуть накладатися напруги згину.



1 верхня розетка 2 нижня розетка 3 витягнута серцевина

Рисунок 2.10 - Приклад, що ілюструє метод вимірювання для визначення залишкових напружень а) початковий стан, б) стан після видалення «серцевини»

Розетка тензодатчика прикріплюється до точки інтересу, а напрямок її вимірювальної сітки встановлюється відносно об'єкта вимірювання. Потім вимірювання з окремих вимірювальних сіток записуються в цьому початковому стані. Якщо задіяні накладені напруги згину, інша розетка прикладається точно навпроти першої розетки з іншого боку, використовуючи ту саму процедуру [23]. Потім ділянку матеріалу, що несе розетку, витягують за допомогою кільцевого фрезерного інструменту або іншим відповідним способом. Витягнуте ядро тепер вільне від сил навколишнього матеріалу, які раніше діяли на нього. Отже, він повертається до свого природного, ненапруженого стану. Подальші вимірювання з кожної з вимірювальних сіток показують зміну ситуації. Оцінка проводиться за формулами для розмірів розетки. Єдине, на що слід звернути увагу, це те, що зняття напруги вимірюється, тобто залишкова напруга має протилежний знак. Було виявлено, що немає необхідності повністю вирізати серцевину з досліджуваного об'єкта, особливо якщо йдеться про компактні структурні частини та де доступ з обох сторін, який доступний лише за допомогою пластин, неможливий. Достатньо встановити відносно неглибоку канавку у формі кільця, яка адекватно знімає напругу на поверхні сердечника, рисунок 2.11. З «методом кільцевої серцевини», як це відомо, обмеження методу щодо товщини деталі більше не застосовуються. Глибина кільцевої канавки впливає на отриманий ступінь зняття напруги, який необхідно враховувати при оцінці результатів.

Оптимально розроблена для цього процесу спеціальна розетка кільцевої серцевини зображена на рисунку 2.12.

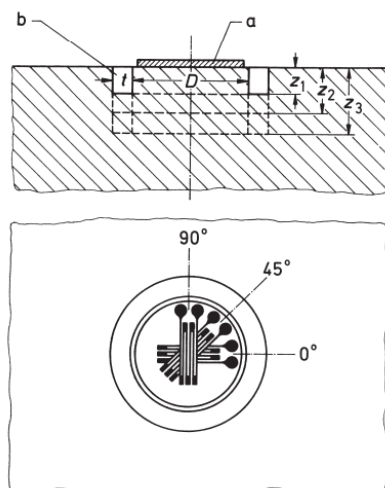


Рисунок 2.11 - Метод кільцевого ядра Бема і Вольфа. а) кільце-серцевина розетка, б) кільцева борозенка

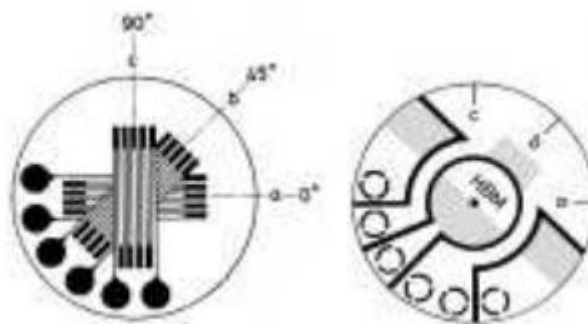


Рисунок 2.12 - Спеціальна розетка тензодатчика для методу кільцевої серцевини, розроблена Бьомом і Вольфом а) розташування вимірювальної сітки, б) зовнішній вигляд

Старішим методом вимірювання залишкової напруги є «метод свердління отворів». Просвердлюється невеликий отвір, який порушує існуючий напружений стан. Силі лінії потоку змінюються, а просвердлений отвір деформується по краях, рисунок 2.13.

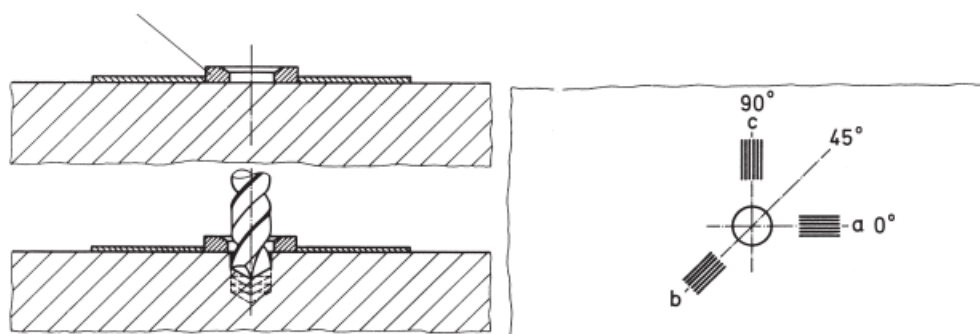


Рисунок 2.13 - Метод свердління отворів

Досить просвердлити отвір глибиною, що дорівнює його діаметру. Спеціальна розетка для свердління отворів має три вимірювальні сітки, розташовані під кутом $0^\circ/45^\circ/90^\circ$, щоб можна було провести кількісний і якісний аналіз напруги. Маленька втулка для свердла забезпечує центральне розташування отвору, що є важливою умовою для отримання точних результатів.

Збільшення напруги на краях просвердленого отвору через ефект надрізу накладає обмеження на метод. Тут матеріал може бути деформований безпосередньо в області текучості, хоча залишкові напруги все ще нижче цієї межі.

2.5 Перетворювачі на основі тензодатчиків

Перетворювачі можуть виготовлятися та виготовляються за різними принципами роботи: резистивні, індуктивні, ємнісні, п'єзоелектричні тощо. Наприклад, мініатюрні акселерометри для вимірювання динамічних сил прискорення у великому діапазоні зазвичай виготовляються з п'єзоелектричними чутливими елементами через малі розміри та вага, а також

самогенерований електричний вихід. Подібним чином, коли цього вимагає якийсь особливий аспект застосування, можна використовувати ємнісні або індуктивні датчики. Проте тензорезистор з металевим кріпленням, завдяки своєму унікальному набору робочих характеристик, легко домінував у галузі перетворювачів протягом останніх двадцяти років або близько того. Справжнє походження тензодатчика втрачено в історії. Лорд Кельвін повідомив про зміну опору електричних проводів у 1800-х роках. У 1908 році д-р Ст. Ліндек із Шарлоттенбурга в Німеччині висунув припущення, що саме може бути першим тензодатчиком тиску. Він працював з точними резисторами, які складалися з тонкого манганінового дроту, намотаного на тонкостінні латунні трубки [21]. Метод побудови передбачав покриття дроту шелаком, а потім запікання вузла для міцного з'єднання дроту з трубкою. У дослідженні факторів, що впливають на стабільність таких резисторів, Сент-Ліндек замкнув кінці трубок, створив у них внутрішній тиск близько 800 фунтів на м^2 . У його доповіді говорилося: «Метод вимірювання високого тиску може бути заснований на цьому». Рисунок 2.14 є ілюстрацією з патенту США № 2,365,015, виданого Е. Е. Сіммонсу в 1944 році, на зв'язаний тензометричний перетворювач тиску.

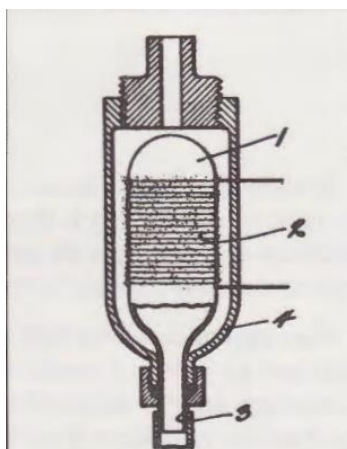


Рисунок 2.14 - Рання концепція тензометричного перетворювача тиску

Хоча це, звичайно, неправда, що «немає нічого нового під сонцем», важко бути повністю оригінальним! Е. Е. Simmons і А. С. Ruge, як правило, вважаються співавторами тензодатчика на дроті. Руге, зокрема, зіграв важливу роль у впровадженні багатьох практичних форм зв'язаних вимірювальних приладів і різних типів перетворювачів, які його включають. Незв'язані дротяні тензорезистори були відомі та використовувалися в перетворювачах до і після введення пов'язаних калібрів, але вони були набагато менш універсальними і менш точними. У 1950-х роках були представлені тензодатчики, скріплені металевою фольгою, які швидко витіснили дротяні датчики в більшості типів тензодатчиків. Використання фольги замість дроту покращило розсіювання тепла, зменшило ефект повзучості та дало більше свободи проектування в адаптації форм і розмірів датчиків до складної геометрії перетворювача. Типові комерційні конструкції перетворювачів із застосуванням фольгових тензодатчиків опору показані на рисунку 2.15.

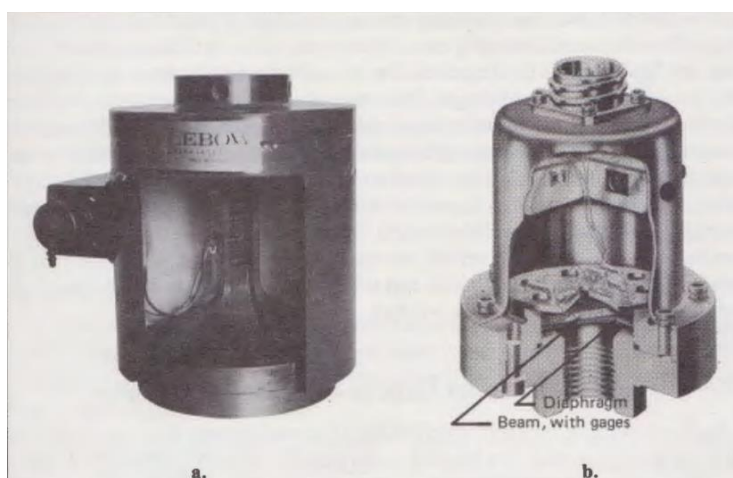


Рисунок 2.15 - Типові тензометричні перетворювачі: а. Відрізний тензодатчик (з дозволу Eaton Corp.fLebow Products), б. Креслення камери тиску в розрізі (з люб'язного дозволу Viatran Corp.)

2.5.1 Напівпровідникові тензорезистивні датчики

Напівпровідникові тензорезистивні датчики, що походять від напівпровідникової технології, виготовляються у формі зразків калібрувальних приладів, нанесених на відповідні ізоляційні підкладки, і у вигляді невеликих брусків або стрічок із легованого кремнію, оснащених тонкими дротами та пристосованих для адгезивного з'єднання зі структурою перетворювача. Високі калібрувальні коефіцієнти (від 20 до 100), малий розмір і високий опір характеризують ці п'єзорезистивні вимірювальні прилади. Вони добре підходять для використання на мініатюрних високопродуктивних перетворювачах. Хоча вони не є ані такими практичними, ані настільки широко використовуваними, як звичайні металеві датчики у високоточних перетворювачах загального призначення. Варто зазначити, що спочатку напівпровідникові датчики вважалися вигідними через високу продуктивність[24]. Сьогодні це не так важливо, тому що та сама напівпровідникова технологія, яка створила цей тип датчика, також створила менші, менш дорогі підсилювачі для використання зі звичайними металевими датчиками.

2.5.2 Насаджені металеві вимірювальні прилади

За останні кілька років було виконано велику роботу з осадження тонких плівок чистих металів і металевих сплавів. Такі металеві плівки можна наносити на попередньо ізольовані конструкції перетворювачів і використовувати як прикріплені тензодатчики опору. Осадження можна здійснити через відповідну маску, що безпосередньо призводить до бажаної

конфігурації калібру; або нанесену плівку можна згодом замаскувати та вигравіювати у відповідну калібрувальну форму. Потенційні переваги таких датчиків включають усунення шарів органічного адгезиву (за рахунок використання нанесених неорганічних ізоляційних плівок) і недорогі методи виробництва у великих обсягах. Однак на практиці поєднати ці переваги було непросто. Крім того, продуктивність нанесених плівок є значно нижчою в кількох аспектах, ніж у точно згорнутих плівок із деформованих сплавів. Таким чином, як і напівпровідникові тензодатчики, датчики з нанесеною плівкою в основному використовуються в перетворювачах спеціального призначення, які можуть належним чином використовувати переваги своїх незвичайних, але обмежених робочих характеристик.

2.6 З'єднаний тензодатчик як елемент перетворювача

Жоден принцип вимірювання не є ідеальним для всіх застосувань перетворювача. І, як і всі інші відомі датчики, з'єднаний тензодатчик має певні обмеження. Щоб повною мірою скористатися його характеристиками — щоб оптимізувати конструкцію перетворювача з точки зору вартості та продуктивності — важливо розуміти які є переваги та недоліки тензодатчика, а також, які форми вони приймають. По-перше, слід добре розуміти принципи роботи різних типів датчиків і вибрати перетворювач, режим відгуку якого сумісний з проблемою вимірювання. Припустимо, хтось хоче виміряти переміщення в діапазоні, скажімо, одного сантиметра. У такому випадку найбільш практичним чутливим елементом зазвичай буде той, який безпосередньо реагує на зміщення. Можливі варіанти включають диференціальні трансформатори (LVDT), оптичні кодери або лінійні

потенціометри. Різні специфікації щодо розміру, точності, вартості, робочого середовища та, певною мірою, типу бажаного вихідного сигналу будуть визначати остаточний вибір. У цьому прикладі тензодатчик зазвичай не буде першим вибором, оскільки тензодатчик реагує на деформацію, а не на переміщення. У деяких випадках вибір датчика буде залежати від спеціальних характеристик, необхідних для перетворювача, ніж від основного режиму спрацьовування чутливого пристрою. Якби діапазон переміщення в один міліметр був необхідний у вищевказаному датчику переміщення разом із тривалим терміном служби, широкою частотною характеристикою, ударостійкістю та помірною відновлюючою силою в зонді приводу, повномостова мережа тензодатчиків, встановлена на консольній пружині, могла б бути відповідним рішенням. Необхідно підкреслити ось що: певні форми перетворювачів добре підходять для з'єднаних металевих тензодатчиків, а деякі ні. Якщо тензодатчики використовуються там, де вони не є логічним першим чи другим вибором, кінцевий результат не буде оптимальним. Найважливіші експлуатаційні характеристики тензорезисторів із скріпленням металевим опором для датчиків наведено в списку нижче.

Майте на увазі, що вимірювальний прилад реагує на поверхневу деформацію в конструкції, і що в будь-якому звичайному використанні відповідна пружинна структура повинна бути ретельно розроблена в перетворювач. Цей пружний елемент часто називають «пружиною», оскільки він зазвичай забезпечує необхідну силу опору та відновлення.

2.6.1 Технічні дані тензодатчиків

Характеристики та параметри, описані в цьому розділі, важливі для вимірювань тензодатчиків, а також дають корисну інформацію для вибору

тензодатчиків з огляду на спеціальні вимоги. Показники визначені за рекомендаціями, наведеними в [25]. Слід також зазначити, що більшість параметрів тензодатчиків можна визначити лише за допомогою вже прикріплених датчиків. Отже, характеристики використовуваного клею також можуть впливати на параметри, напр. клей може обмежити термічний діапазон застосування тензодатчика. Необхідно також чітко вказати, що обмеження можуть бути вказані лише в межах певних меж вимірювання. Чітко визначені межі рідко виникають, і час, температура та інші впливові параметри можуть зміщувати прийнятні межі. Тому в [25] замість одного значення параметра використовується графічне представлення, яке показує зміну параметрів під впливом важливих змінних.

2.6.2 Чутливість (калібрувальний коефіцієнт) для металевих тензодатчиків

Було також зазначено, що деякі метали демонструють лінійну залежність між відносною зміною опору та деформацією. Якщо ці метали, які є різними типами сплавів, також демонструють низький або незначний температурний коефіцієнт електричного опору, то вони можуть бути обрані для виготовлення тензодатчиків. Інші сплави застосовуються, якщо є спеціальні вимоги до температурної стабільності або стійкості до втоми при динамічному навантаженні. Чутливість тензодатчика виражається відношенням відносної зміни опору до деформації та позначається символом k

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Відповідними розмірними одиницями є

$$(k) = \left\{ \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \right\} \left[\frac{\Omega/\Omega}{m/m} \right] \quad (2.2)$$

Одиниці є значущими лише в обчисленнях розмірів; на практиці вони скасовуються так, що калібрувальний коефіцієнт k виглядає як безрозмірна величина.

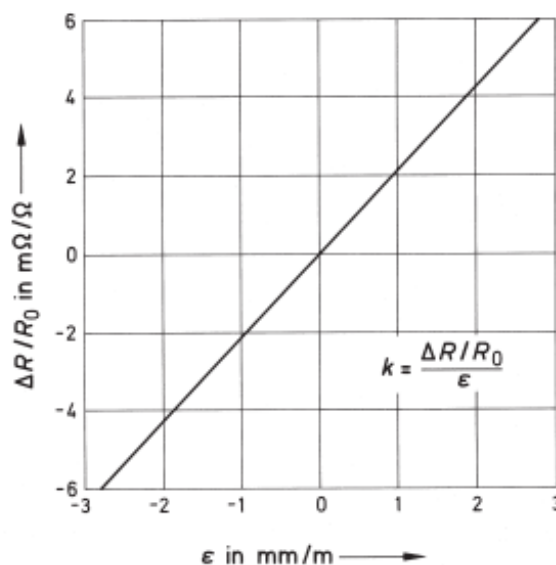


Рисунок 2.16 - Характеристика металевого тензорезистора і визначення коефіцієнта калібру

На діаграмі залежності опору від деформації нахил тензометричної характеристики представляє коефіцієнт k , рисунок 2.16. На відміну від параметра S розтягнутого провідника, який визначено в розділі 1.2.1 (рівняння 1.2), коефіцієнт k є параметром, коефіцієнтом пропорційності, для повного тензодатчика. Вплив конфігурації вимірювальної решітки та умови передачі деформації в вимірювальну решітку викликають різницю між S і k , хоча зазвичай вона незначна. З цієї причини калібрувальний коефіцієнт k

визначається виробником, використовуючи як тестовий зразок для кожної виробничої партії відповідно до правил [26]. Статистичні методи гарантії якості дотримуються, а цифру вказано в таблиці даних, що додається до пакет тензодатчиків.

Неможливо відкоригувати калібрувальний коефіцієнт під час виробництва, щоб досягти конкретного значення. У таблиці 2.1 для нормальної вимірювальної сітки наведено середні значення коефіцієнта вимірювання сплавів.

Таблиця 2.1 Середні коефіцієнти вимірювання для тензодатчиків з різними сплавами вимірювальної сітки

Матеріал вимірювальної сітки (торгова назва)	Орієнтовні значення для складу [%]	В середньому прибрл. калібрувальний коефіцієнт, к
Константин	57 Cu, 43 Ni	2.05
Карма	73 Ni, 20 Cr, res. Fe + Al	2.1
Ніхром V	80 Ni, 20 Cr	2.2
Платино-вольфрам	92 Pt, 8 W	4.0

Той факт, що металеві тензодатчики мають лінійну характеристику, потребує уточнення. Для тензодатчиків з константовою вимірювальною сіткою виявлена нелінійна характеристика в області великих деформацій до $150\,000\text{ мк/м} = 15\text{ см/м}$. Відношення є параболічним і може бути досить добре апроксимовано поліномом виду $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} + \dot{\epsilon}^2$. Можна припустити, що інші сплави вимірювальної сітки мають подібну поведінку. Якщо тензодатчик

працює в зоні високої напруги, як це зазвичай буває в четвертних мостових схемах, компенсація нелінійності тензодатчика забезпечується автоматично.

2.7 Переваги та недоліки тензометричних перетворювачів

Конфігурація та вибір матеріалу для пружинного елемента часто є найважливішими рішеннями, які приймаються в успішній конструкції перетворювача. Ці теми детально розглядаються в наступних розділах монографії.

Переваги:

1. Малі розміри та дуже мала маса: важливі для мінімізації інерційних (ударних) ефектів. Дозволяє працювати в дуже широкому діапазоні частот (при постійному струмі) до понад 50 кілогерц. Верхнє обмеження частоти встановлюється головним чином розміром сітки тензодатчика (довжиною калібру).

2. Повністю з'єднана з основною пружинною конструкцією: разом із (І) вище ця відсутність важливих механічних з'єднань – або «слабких частин» – призводить до міцної, ударостійкої конструкції.

3. Відмінна лінійність у широкому діапазоні деформацій: у більшості випадків загальна лінійність буде обмежена характеристиками пружинного елемента, а не тензодатчика.

4. Низькі та передбачувані термічні ефекти: прості методи компенсації та корекції забезпечують точну роботу в широкому діапазоні температур.

5. Висока стабільність у часі: якщо належним чином захищені від перевантажень і руйнівного середовища, тензометричні перетворювачі дуже добре зберігають калібрування протягом тривалих періодів часу.

6. Відносно низька вартість: загальна вартість перетворювача є складним і важливим аспектом процесу проектування. Вартість вимірювання рідко є важливим фактором.

7. Вихід ланцюга – це зміна опору: тензодатчик опору є пасивним (на відміну від самогенеруючого датчика). Оскільки він практично нечутливий до частоти напруги живлення, його можна використовувати зі змінним струмом. Датчики зазвичай працюють у певній формі мостової схеми, і ці схеми можуть бути легко організовані для зміни реакції перетворювача шляхом додавання або віднімання моментів і сил. Це дозволяє відносно просту конструкцію складних перетворювачів, які реагують на кілька компонентів вхідної сили за потреби.

Недоліки:

1. Термічна деградація: вимірювальні прилади, що використовують органічні матеріали як носії, адгезиви та захисні компоненти, є найбільш точними, універсальними та простими у використанні, але обмежені у застосуванні при високих температурах характеристиками конкретної органіки. Максимальна робоча температура для таких перетворювачів зазвичай коливається від 150° F (66° C) до, можливо, 500° F (260° C), залежно від технічних характеристик, часу впливу та робочого середовища для вимірювальних приладів. Низькі температури не викликають серйозних проблем, а перетворювачі для використання при криогенних температурах легко сконструювати.

2. Вихідні сигнали відносно низькі: Точне, стабільне підсилення та контрольована напруга збудження є важливими для точних приладів зчитування. Однак із сучасною електронікою це зазвичай не становить значної проблеми з витратами. Точність системи часто більше обмежена відношенням

сигнал/шум, яке є досить хорошим для тензометричних перетворювачів через їхні схеми з низьким реактивним опором і помірним омичним опором.

3. Потрібні ретельні процедури встановлення: на продуктивність з'єднаних вимірювальних приладів сильно впливають матеріали та процедури, які використовуються для з'єднання вимірювальних приладів на місці, підключення їх до ланцюга та забезпечення захисту від пошкоджень під час використання та факторів навколишнього середовища. Без ретельного, суворого контролю кожного аспекту процесу монтажу неможливо досягти передбачуваного недорогого виробництва перетворювача.

4. Вплив вологи: прості органічні захисні системи для тензорезисторів на клеях можуть бути ефективними, але вони матимуть обмежений термін служби при впливі надмірної вологи. З часом вода досягне тензодатчиків і знищить їх або погіршить їх роботу. Для надійної довгострокової точності за таких умов справжня герметичність перетворювача є важливою.

2.8 Пружинні елементи

Незважаючи на те, що тензодатчик був розроблений і комерціалізований близько 40 років тому, до недавнього часу його основною сферою застосування була промислова, тобто в управлінні процесами, важкому машинобудуванні, випробувальній техніці тощо. Однак за останнє десятиліття тензодатчик вторгся (і в значній мірі завоював) поле зважування. У зв'язку з потребою в вагах, що мають електричні вихідні сигнали для роботи популярних цифрових дисплеїв, а також для взаємодії з мікропроцесорами та комп'ютерами, тензодатчик став представляти найбільш практичний засіб зважування. Електронні ваги на основі тензодатчиків зараз

стали звичайним явищем. Одне з найбільших застосувань - у роздрібній торгівлі, але інші включають поштові та транспортні ваги, кранові ваги, лабораторні ваги, бортове зважування для вантажівок, сільськогосподарське застосування тощо. Найважливішим механічним компонентом будь-якого тензодатчика або іншого тензодатчика, як правило, є пружинний елемент[27]. У широкому сенсі функція пружинного елемента полягає в тому, щоб служити реакцією на прикладене навантаження; і, роблячи це, сфокусувати вплив навантаження на ізольоване, бажано однорідне, деформаційне поле, де можна розмістити тензодатчики для вимірювання навантаження.

Неявним у цьому визначенні є припущення, що рівень деформації в зоні з кляпом пружинного елемента лінійно-пружним чином реагує на прикладене навантаження лінійно-пружним чином. Іншими словами, ідеальний перетворювач буде характеризуватися незмінним, пропорційним співвідношенням між деформацією і навантаженням. Досягнення цієї простої за звучанням, але недосяжної мети є центральним у всій конструкції перетворювача. Це завдання ускладнюється, перш за все, наявністю численних інших експлуатаційних та економічних обмежень, які повинні бути одночасно задоволені, щоб отримати практичний, життєздатний комерційний перетворювач. Складність ускладнюється тим, що різноманітні ефекти, які мали б другорядне або третє значення в звичайній інженерній практиці, можуть стати дуже значущими в прецизійному приладі. У зв'язку з цими міркуваннями ми повинні ретельно вивчити конструкцію пружинних елементів, перш ніж переходити до інших аспектів проектування тензодатчиків. Для цілей цього обговорення пружинні елементи тензодатчиків будуть розділені на три класи, відповідно до типу використовуваного поля деформацій. Це: (а) згинання, (б) розтягування і (в) зсув, як схематично зображено на рисунку 2.17.

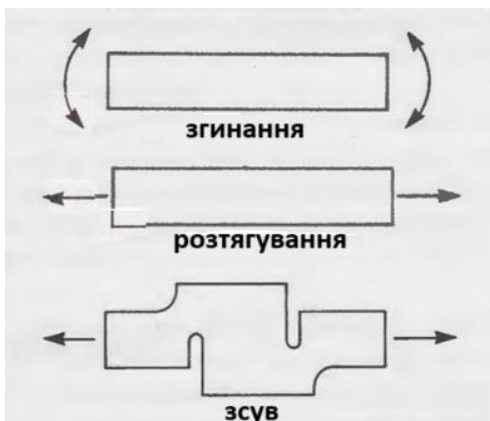


Рисунок 2.17 - Три режими деформації пружинного елемента, які зазвичай використовуються в перетворювачах.

У той час як в сучасній практиці перетворювачів використовуються різні форми всіх трьох типів, найбільш багате розмаїття по конфігурації, безсумнівно, зустрічається серед згинальних елементів, і вони будуть описані в першу чергу. Підготувавшись до цього, однак, буде плідно розглянути список основних конструктивних міркувань та критерії, які застосовуються до всіх пружинних елементів перетворювача. На цьому тлі буде простіше оцінити основні причини деяких екзотичних конфігурацій, що використовуються в комерційних тензодатчиках.

2.8.1 Конструктивні міркування

Наступні критерії в загальному випадку застосовні до всіх пружинних елементів тензодатчика. Не слід тлумачити порядок, в якому вони представлені, оскільки відносна важливість, що надається будь-якому з них, залежить від типу і призначення конкретного перетворювача, що бере участь. Крім того, вони не незалежні один від одного, а мають численні взаємодії.

Хороша конструкція перетворювача вимагає розсудливих, обізнаних компромісів і компромісів між цими критеріями.

1) Власна частота

Зазвичай власна частота пружинного елемента повинна бути настільки високою, наскільки це можливо зробити, що відповідає заданій чутливості та іншим робочим вимогам до тензодатчика. Зазвичай це вимагає жорсткої конструкції, яка не відповідає вимогам, без зайвої маси.

2) Відповідний рівень деформації в зоні датчика при номінальному навантаженні

На ранньому етапі проектування пружинних елементів необхідно встановити пропорції елементів таким чином, щоб у зоні датчика розвивався заздалегідь визначений рівень деформації, коли пристрій піддається номінальному навантаженню. Виходячи з комбінації декількох різних обмежень (лінійність відгуку матеріалу пружини, термін служби втомленості тензодатчиків, сумісність приладів тощо), рівень часто встановлюється в діапазоні від 1000 до 1700 Дж. ЛЕ. З чотирьохкалібрувальним повністю активним мостовим ланцюгом, 1500 Дж. ЛЕ буде виробляти номінальний вихідний сигнал 3 м VI V мостового збудження, заснований на калібрувальному коефіцієнті 2,0. Більш високі рівні деформацій використовуються в тих випадках, коли необхідно досягти однакової калібрування 3 м VI V в наявності схеми компенсації дисипативного випромінювання.

3) Рівномірний розподіл деформацій у зоні тензодатчика

Оскільки електричний вихід тензодатчика обмежений максимально допустимим рівнем деформації в області датчика, цей рівень деформації повинен існувати рівномірно по всій площі вимірювальних решіток для максимізації сигналу. Коли це можна зробити, якщо паяльні вкладки датчиків лежати на ділянці з меншим навантаженням, це, як правило, покращить термін служби датчиків від втоми.

4) Нижчі рівні деформації протягом решти пружинного елемента

Величина деформації в зоні з кляпом пружинного елемента повинна бути не тільки рівномірно розподілена та на належному рівні, щоб виробляти бажаний вихідний сигнал повного навантаження, але зазвичай вона також повинна бути найвищим рівнем деформації в будь-якому місці всього пружинного елемента. В цілому, багато характеристик роботи тензодатчиків, наприклад, термін служби, лінійність, свобода від повзучості і гістерезису - будуть поліпшені за рахунок мінімізації рівнів деформації по всій конструкції. Як сказав Геракліт близько 2500 років тому, «все тече». У нашому контексті це означає, що всі тверді тіла, включаючи найкращі матеріали пружинних елементів, коли за їхньою поведінкою спостерігають досить уважно, виявляють певний ступінь мікропластичності під напругою. Отже, очевидно, що менші напруження означають менші відхилення від ідеальної лінійно-пружної поведінки. Вони також можуть означати більшу жорсткість і вищу власну частоту для пружинного елемента.

5) Монолітна (нероз'ємна) конструкція

За інших рівних умов повторюваність, лінійність і свобода від гістерезису будуть найкращими в тензодатчику, пружинний елемент якого

обробляється повністю цільним шматком із цільної заготовки. Навіть незважаючи на те, що деформація пружинного елемента під навантаженням може бути дуже незначною, і не помітна візуально, вона, тим не менш, реальна і кінцева. За цих обставин нецілісні механічні зв'язки будь-якого виду викликають дрібні рухи та тертя, а отже, нелінійність та гістерезис. Також бажано уникати зварних з'єднань через залишкові напруги та металургійні ефекти, які можуть обмежити термін служби втоми та сприяти поведінці мікропластику.

6) Дизайн для зручності обробки та встановлення датчиків

Щоб бути успішним на ринку, тензодатчик або інший перетворювач повинен мати конкурентоспроможну ціну. Процес досягнення цього в рамках накладених функціональних обмежень дає можливість для значної винахідливості в проектуванні елементів. Відповідаючи всім іншим критеріям проектування в цьому списку, можна мало що отримати, якщо отриманий елемент пружини надмірно складно і дорого обробляти. Не менш важливо повною мірою оцінити економічність установки тензодатчика. Вартість виготовлення установки датчика якості перетворювача, навіть за ідеальних обставин, зазвичай набагато вища, ніж вартість самого датчика. Тому пружинний елемент завжди слід проектувати з урахуванням процесу встановлення датчика. Зазвичай (коли це можливо) одна плоска зовнішня поверхня найкраще піддається легкому та швидкому встановленню датчиків. Якщо інші обмеження перешкоджають цьому, то під час проектування слід приділити особливу увагу тому, як будуть виконуватися різні процедури монтажу - підготовка поверхні, нанесення клею, розміщення калібру, затиск, затвердіння, електромонтаж тощо.

7) Захист від перевантаження

Досвід виробників перетворювачів показує, що найпоширенішою єдиною причиною несправності датчика під час польового обслуговування є перевантаження. У деяких конструкціях конфігурація пружинного елемента підходить для легкого включення механічного упору. В інших корпус або корпус перетворювача може використовуватися для обмеження деформації пружинного елемента. Як правило, комерційні тензодатчики призначені для того, щоб витримувати перевантаження до 150 - 200% від номінального навантаження без пошкоджень і від 300 до 500% перевантаження до руйнування тензодатчика.

8) Вибірковість спрацьовування

У більшості випадків ідеальний тензодатчик буде реагувати на сили або компоненти сили тільки по одній осі, при цьому він нечутливий до силових надходжень з інших напрямків, а також до прикладених пар. У той же час у багатьох випадках реакція тензодатчика повинна бути незалежною від точки прикладання навантаження, принаймні на деякій заданій площі. Незважаючи на те, що ідеальної поведінки тензодатчика ніколи не можна досягти, до нього можна наблизитися досить ретельним проектуванням агрегату. Це часто включає в себе не тільки пружинний елемент як механічний компонент, але і розміщення тензодатчиків на елементі, а також конструкцію опорної та/або огорожувальної конструкції.

9) Прогин пружинного елемента

Для того, щоб у пружинному елементі з прикладеним навантаженням виникали деформації на зручно вимірюваному рівні, необхідно, щоб елемент зазнав кінцевої деформації. Це означає, що геометрія пружинного елемента

дещо змінюється під навантаженням, і що точка прикладання навантаження зміщується відповідно. Будь-яка зміна геометрії неминуче супроводжується ступенем нелінійності у відповідь. Таким чином, жорсткість пружинного елемента вигідна не тільки з точки зору власної частоти, але і для мінімізації нелінійностей через геометричні зміни. Крім того, при будь-якому зміщенні точки прикладання навантаження таке зміщення матиме найменший вплив на точність і лінійність тензодатчика, якщо це прямолінійний рух, уздовж осі навантаження.

10) Теплові міркування

Спочатку можна було б припустити, що процес досягнення оптимальної конфігурації пружинних елементів є виключно питанням хорошого механічного дизайну, але це не обов'язково так. Також необхідно враховувати теплові ефекти, і два з них, зокрема, впливають на конфігурацію пружинного елемента. З одного боку, тензодатчик є джерелом тепла, яке в значній мірі розсіюється в пружинному елементі. Щоб мінімізувати дестабілізуючий температурний вплив як на пружинний елемент, так і на реакцію датчика, конфігурація елемента повинна бути симетричною щодо розташування датчиків. Крім того, тензодатчик у типовому польовому обслуговуванні часто піддається температурному градієнту від одного кінця до іншого або з одного боку до іншого. Збурюючі ефекти таких температурних градієнтів можна зменшити за допомогою ретельного теплового проектування. Для цього необхідно враховувати шляхи теплового потоку від корпусу тензодатчика до пружинного елемента та всередині пружинного елемента. Зокрема, важливо спроектувати мінімальний тепловий опір між тензодатчиками в сусідніх плечах однієї мостової схеми.

2.9 Елементи згинання

Пружинні елементи, в яких використовуються балки або променеві конфігурації, що піддаються згинальним моментам, широко використовуються в сучасних комерційних перетворювачах. Існує кілька причин популярності згинальних елементів, і вони, як правило, впливають з внутрішніх властивостей балок. Балка - це конструктивний елемент з високою напругою і низьким зусиллям, в порівнянні, наприклад, з колоною такого ж поперечного перерізу. Крім того, у випадку балки з поперечним перерізом, симетричним щодо осі згину, завжди є дві поверхні, які піддаються однаковим деформаціям протилежного знака. Це є зручним засобом для реалізації повної мостової схеми шляхом встановлення протилежних пар датчиків на двох поверхнях. Якщо промінь досить тонкий, таке розташування призведе до хорошої температурної компенсації, оскільки різниця температур між вимірювальними приладами може бути дуже низькою. Додатковою перевагою є те, що конфігурації балок часто можуть бути розроблені таким чином, щоб забезпечити плоскі, відкриті поверхні для зручності встановлення тензодатчика.

Базова консольна балка Найпростішою (але в цілому не найкращою) конфігурацією балки для згинального перетворювача є базова консольна балка (рис.2.18а). Пари поздовжньо вирівняних тензодатчиків встановлюються на верхній і нижній поверхнях, біля кореня балки. Незважаючи на низьку вартість виготовлення, і зручний для установки тензодатчика, цей тип пружинних елементів має ряд недоліків по відношенню до попереднього списку бажаних конструктивних характеристик. Як описано нижче, деякі недоліки можна подолати за допомогою конструктивних удосконалень, але інші є фундаментальними для конфігурації консолі. У консольному пружинному

елементі єдиною корисною функцією, яку виконує більша частина довжини балки, є перетворення прикладеного навантаження в згинальний момент в зоні вимірювання. У той же час, однак, ця частина довжини балки значно впливає на прогин в точці прикладання навантаження, а також на масу, що піддається зміщенню. В результаті пружинний елемент має тенденцію до низької власної частоти. Конструкцію можна дещо вдосконалити, сконцентрувавши деформацію в основному в області вимірювання, як показано на рис.2.18b. При тому ж рівні деформації в зоні датчика прогин тепер набагато нижче, але маса збільшена. Подальше поліпшення може бути досягнуто за рахунок зменшення маси подовжувача балки; і це можна здійснити, наприклад, зробивши подовжувач балки порожнистим, як на рис.2.18c. Використання алюмінієвого сплаву замість сталі для матеріалу балки також призведе до меншого прогину та вищої власної частоти при тому ж рівні деформації в зоні вимірювання. З вищезазначеними змінами в конструкції простий консольний пружинний елемент став помітно менш простим і дорожчим у виготовленні. На жаль, йому все ще не вистачає деяких бажаних атрибутів оптимального пружинного елемента. Оскільки траєкторія переміщення в точці прикладання навантаження є криволінійною, точка переміщається вбік при відхиленні. Також в цих умовах навантаження вже не подається в напрямку, перпендикулярному осі балки. Якщо ці ефекти не усунені або не компенсовані, обидва будуть мати тенденцію обмежувати кінцеву точність і лінійність перетворювача. Ще одна небажана особливість конструкції в тому вигляді, в якому ми її зараз маємо, полягає в тому, що розподіл деформації не є рівномірним по довжині сітки тензодатчика. Деформація найвища у напрямку до нерухомого кінця балки і лінійно зменшується по довжині калібру. Цей ефект найбільш помітний на коротких пучках, так як градієнт деформації змінюється обернено пропорційно довжині променя. Ми можемо подолати цей

недолік, додавши ще одне конструктивне удосконалення - тобто, змінюючи ширину балки в зоні вимірювання, щоб утворити балку з постійним напруженням. Стан постійної напруги найлегше можна отримати, лінійно звужуючи сторони балки, як показано на вигляд у плані, рисунок 2.18d. Для цього можна досягти бажаного результату, до речі, проєктовані подовжувачі двох кінцевих сторін повинні зустрітися в точці прикладання навантаження.

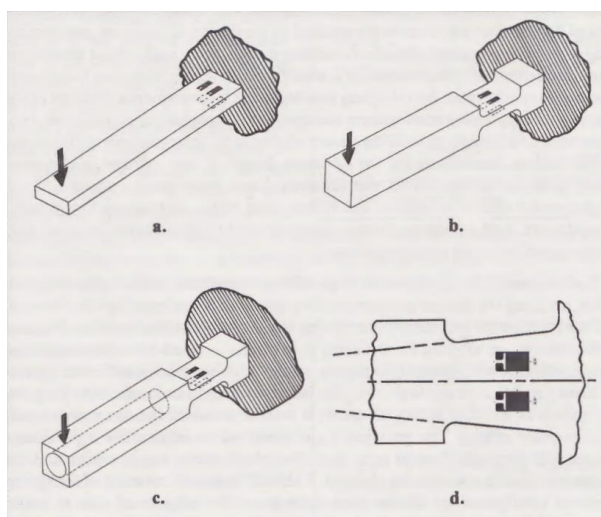


Рисунок 2.18 - Основний пружинний елемент з консольною балкою з послідовними вдосконаленнями конфігурації для подолання обмежень продуктивності

2.10 Підвищення продуктивності

Як концептуально, так і історично консольна балка є прототипом пружинного елемента згинання для тензодатчиків. Однак з вищесказаного повинно бути очевидно, що ми принаймні підійшли до точки спадної віддачі в наших спробах подолати внутрішні обмеження продуктивності простої консольної конфігурації. У зв'язку з цим розробники тензодатчиків вивчили велику різноманітність інших форм згинальних балок, намагаючись

оптимізувати роботу перетворювача відповідно до раніше перерахованих критеріїв проектування. Кілька більш-менш типових конфігурацій описані в наступному розділі, а серед патентів на тензодатчики можна знайти ще десятки.

Специфікації точності з похибкою 0,03% або менше не є рідкістю в сучасних прецизійних тензодатчиках, особливо тих, які використовуються у високоякісних вагах. Досягнення такої точності вимагає, щоб проектувальник тензодатчиків належним чином враховував ряд ефектів другого і третього порядку, якими зазвичай нехтують при звичайному механічному проектуванні. Наприклад, малі нелінійності 0,1% і менше повністю ігноруються при проектуванні загальних механічних і конструктивних елементів. Але в конструкції перетворювача ці та подібні міркування роблять різницю між комерційно життєздатним точним приладом і імпровізованим датчиком для вимірювань з відносно низькою точністю. У зв'язку з численними спрощуючими припущеннями, закладеними в механіці розчинів матеріалів і, в меншій мірі, в теорії пружності, ці інженерні інструменти самі по собі недостатні для оптимального проектування елементів пружин тензодатчиків. Вони повинні бути доповнені аналітичними та експериментальними дослідженнями ефектів вищого порядку для досягнення уточнень, які відрізняють перетворювачі першої якості. І, звичайно, ніщо не замінить у цьому прагненні старий-добрий досвід і ноу-хау. На жаль, не представляється можливим надати алгоритм або звід узагальнених правил, що визначають конструктивні параметри універсально оптимального пружинного елемента. Це пов'язано з тим, що на геометрію пружинного елемента та його режими навантаження та деформації впливає занадто багато обмежень – номінальна потужність, діапазон вимірювання, фізичний розмір, власна частота тощо – які проявляються в різних комбінаціях для різних застосувань.

Найкраще, що ми можемо зробити в наступних описах згинальних пружинних елементів, - це відзначити деякі з найбільш помітних ефектів вищого порядку. Практична значимість ефектів для конкретної конструкції, очевидно, буде залежати як від технічних характеристик конструкції, так і від геометричних деталей пружинного елемента. У той час як деякі з основних патентів датуються 1950-ми роками або раніше і давно закінчилися, інші можуть залишатися в силі. У зв'язку з цим читачам, які, можливо, розглядають проектування або виробництво тензодатчика, було б добре ознайомитися з патентною літературою, перш ніж це робити.

Багаторазові згинальні елементи для певних типів застосувань характеристики прямої консольної балки можуть бути покращені за допомогою конструкцій, які викликають «багаторазове згинання» (обернену кривизну) в елементі балки. Розглянемо, наприклад, балку, яка вбудована з обох кінців і навантажена в центрі, як показано на рисунку 2.3. Рисунок також включає діаграми згинального моменту та прогину, причому прогин значно перебільшений для наочності.

2.11 Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто та проаналізовано тензометричні перетворювачі, їх види та типи. Розглянуто види деформації тензодатчиків в перетворювачах. Проведено аналіз елементів згинання та пружинних елементів та проведено порівняння їх переваг та недоліків. Запропоновано можливості підвищення продуктивності роботи тензометричних перетворювачів.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ В ПРОГРАМІ MATLAB SIMULINK

Комп'ютерне моделювання різних вимірювальних систем стало важливим інструментом для спеціалістів, які працюють зі складними вимірювальними системами автоматичного управління. Найбільш поширенні причини використання моделювання це – неможливість експериментальної реалізації дослідження або надмірні витрати на тестування реальної системи. Моделювання вимірювальних систем пов'язане із специфічними особливостями, оскільки такі задачі неможливо описати за допомогою декількох дискретних змінних, але їх можна краще зрозуміти, якщо використовувати математичні функції. Прикладом моделювання вимірювальної системи може бути створення математичної моделі тензOMETРИЧНОЇ системи вимірювання. Для вирішення цих завдань можна використовувати професійний пакет MATLAB, PYTHON тощо.

Дані програми містять потужні вбудовані методи, які дозволяють проводити найрізноманітніші обчислення. Можна також легко використовувати графічні команди, тому доступна миттєва візуалізація отриманих результатів. Для розробки даної математичної моделі використана програма MATLAB-SIMULINK.

3.1 Принципи роботи тензOMETРИЧНОЇ системи

Вимірювання деформації за допомогою тензорезистивних перетворювачів є одним із найскладніших у техніці електричних вимірювань. Складність визначається малим діапазоном зміни опору тензорезистора під

впливом деформації. Зміни опору тензодатчика надзвичайно малі та становлять для 100 Ом датчика близько 0,0002 Ом на деформацію 1 мкм/м. Таким чином, деформація 1000 мкм/м (відповідає збільшенню напруги сталі приблизно 200 МПа) змінює опір 100 Ом датчика на 0,2 Ом. Для перетворення настільки малих змін опору вихідні сигнали напруги, які можуть реєструватися, у вимірювальних приладах широко використовується в основному мостова схема. Щоб вимірювати таку малу зміну опору та компенсувати температурну похибку, тензодатчики практично завжди використовують в мостовій схемі, підключеній до джерела напруги або струму (джерелу живлення мосту). Слід зазначити, що загальноприйнятого стандарту живлення моста немає. Типовими є напруги 3 і 10 В. Струм через тензодатчик зазвичай становить від 2 до 30 мА для датчиків з опором від 1 кОм до 120 Ом. Вимірювальний міст прийнято зображати як ромб, боки якого називають плечима, а точки з'єднання плечей – вершинами чи вузлами моста. Міст Уїнстона з живленням від джерела постійної напруги складається з трьох функціональних частин (рисунок 3.1).

Це джерело напруги U , чотири резистори (R_1 , R_2 , R_3 , R_4), що утворюють міст, і реєструюча схема, що включає резистор навантаження R_M . У наведених нижче рівняннях зазначено, що $R_M = \infty$, отже, струм, що протікає через міст, не застосовується у навантаження. Така ситуація спостерігається, коли сигнал з мостової схеми надходить на вхід електронного підсилювача або аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Вихідна напруга моста Уїнстона (різниця напруги точок В і Д) визначається співвідношенням (3.1).

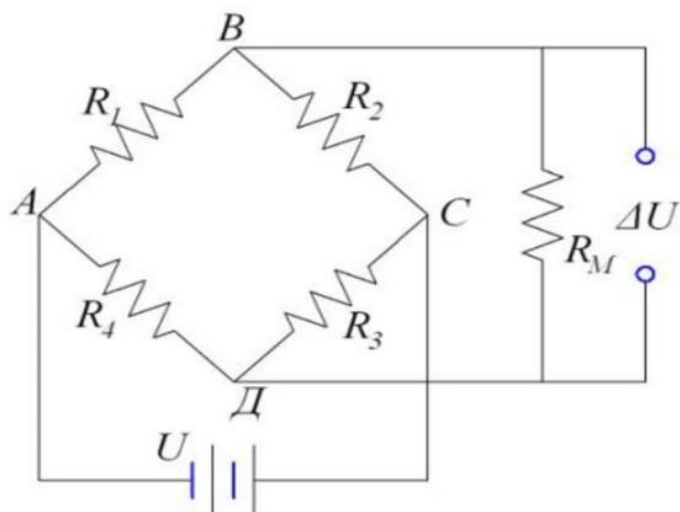


Рисунок 3.1 – Схема підключення «Міст Уінстона»

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \left[\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right] \quad (3.1)$$

Тензорезистори зазвичай виносяться за межі вимірювального пристрою і розташовуються на об'єкті, що досліджується, тоді як резистори, що доповнюють міст, як правило, розташовані у вимірювальному пристрої. У плечі мосту тензорезистори можна включати послідовно, паралельно та змішано.

3.2 Створення програмної моделі тензометричної системи вимірювання

В програмі MATLAB-SIMULINK було розроблено модель тензометричної системи вимірювання, структура якої показана на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Структура математичної моделі тензометричної системи вимірювання

Дана модель складається з наступних елементів на вході розташовані два блоки завдання, перший блок задає постійне значення, другий блок задає випадкові значення, далі слідує функціональний блок програми MATLAB у якому написана математична модель тензометричної системи за допомогою математичної функції, мультиплексор та осцилограф. На рисунку 3.3 показано математичну модель тензометричної системи, яка написана у функціональному блоці MATLAB. Ця модель створена за допомогою програми-функції MATLAB. У ній описується модель вихідної напруги тензометричної системи.

```
>> function Ucal = f(E) % де E=модуль пружності тензодатчика
R=100; % Опір резисторів моста Уінстона
k=2; % Калібровочний коефіцієнт тензодатчика
Uin=10; % Напруга джерела живлення тензодатчика
dR=k*100*E; % Похибка опору тензодатчика при деформації
Rstr=R+dR; % Опір, який з'являється при деформації резистора тензодатчика
Uout=Uin*(Rstr/(Rstr+R)-R/(R+R)); % Вихідна напруга тензометричної системи
Kgaun=0.2 % Коефіцієнт підсилення в підсилювачі для масштабування схеми
Us=Uout*Kgain; % Масштабована вихідна напруга тензометричної системи
end
```

Рисунок 3.3 – Математична модель вихідної напруги тензометричної системи

3.3 Дослідження вихідних характеристик

На рисунку 3.4 показано вихідні характеристики постійного значення сили. На осцилограмі зображені два процеси, що встановилися. Зеленим кольором виділений процес з блоку завдання постійного значення, який вимірюється в мілівольтах. Синім кольором виділений процес вихідної напруги з тензометричної системи вимірювання. Час вимірювання процесів, що встановилися, становить 10 секунд. Блок постійного значення задає значення, що дорівнює 0,001, яке показується на осцилографі вихідною характеристикою за напругою, що дорівнює 1 мВ. Вихідна напруга з тензометричної системи показує значення 0,99 мВ. Це говорить нам про те, що програмна модель виміряла постійне значення з точністю 99%.



Рисунок 3.4 – Вихідні характеристики постійного значення

На рисунку 3.5 зображено імітацію статичного вимірювання за допомогою функціонального блоку рівномірних випадкових чисел з бібліотеки MATLAB SIMULINK. На даній осцилограмі фіолетовим кольором показаний процес з блоку рівномірних випадкових чисел який вимірюється в мілівольтах. Синім кольором виділено перехідну характеристику вихідної

напруги з тензOMETричної системи вимірювання. Діапазон випадкових значень визначається з 0 до 10 мВ. Час виміру процесів, що встановилися, становить 10 секунд. Щоб оцінити точність виміру, зроблено рисунок 3.6 на ньому зображена імітація статичного вимірювання за допомогою блоку рівномірних випадкових значень у наближеному вигляді. На осцилограмі в наближеному вигляді видно, що значення двох процесів, що встановилися, різняться на 0,089 мВ, це означає, що похибка вимірювання становить близько 1 %.

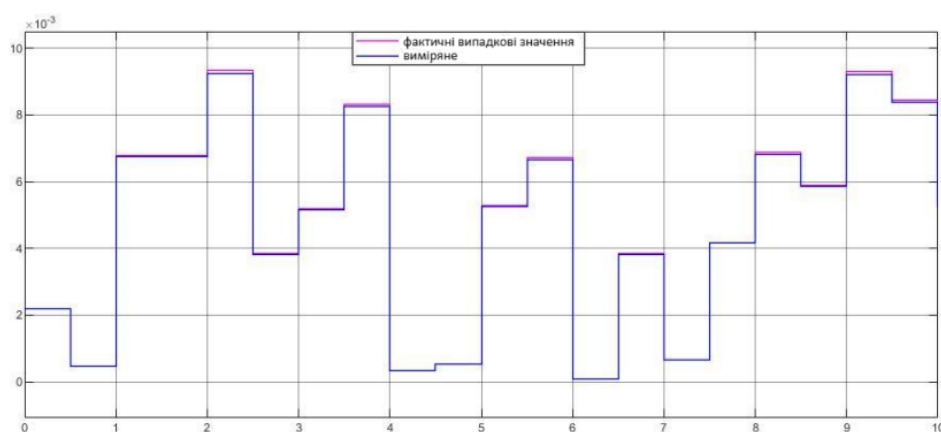


Рисунок 3.5 – Імітація статичного вимірювання за допомогою блоку рівномірних випадкових значень

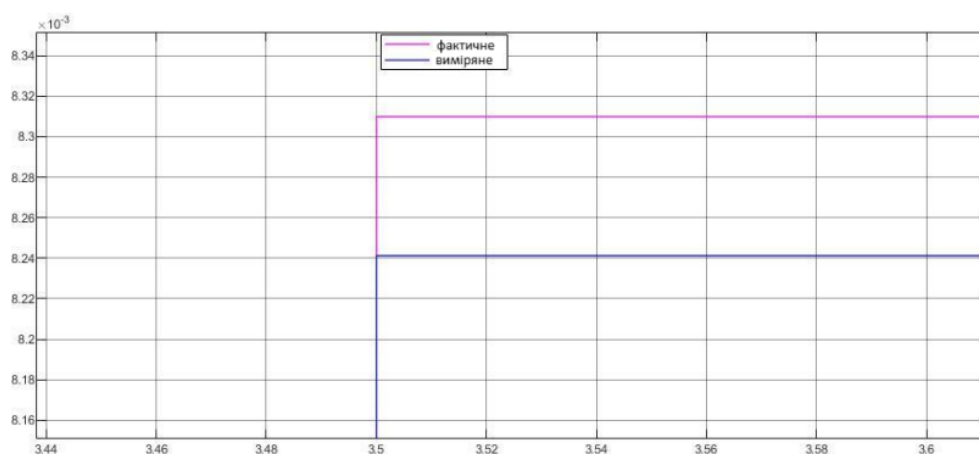


Рисунок 3.6 - Імітація статичного вимірювання за допомогою блоку рівномірних випадкових значень в приближеному вигляді

3.4 Висновки до розділу

В даному розділі проведено математичне моделювання тензометричної системи вимірювання. В результаті моделювання було отримано осцилограми вихідних характеристик фактичного та вимірюваного значення при різних значеннях. При аналізі характеристик фактичних та вимірюваних характеристик, виявлено, що математичне моделювання в програмі MATLAB SIMULINK збігається з розрахунками на 99%.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності;	0	0	0

Продовження таблиці 4.1

Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	50	60	55
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни);	0	0	0

Продовження таблиці 4.1

Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		55,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	70	79	75
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	74,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [28]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 55,0, k_{\text{теор}} = 74,7$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 55,0 + 0,4 \cdot 74,67 = 62,87 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі», даний рівень становить 62,87 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату

основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [28]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 18250,00 \cdot 21 / 21 = 16227,33 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, (грн.)
Керівник науково-дослідної роботи	18250,00	772,73	21	16227,33
Інженер-дослідник мікроелектронної техніки	17300,00	750,00	21	15750,00
Консультант (інженер-метролог вищої категорії)	17300,00	681,82	5	3409,10
Технік	8500,00	404,76	15	6071,43
Всього				41457,86

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» розраховуємо за формулою

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ (грн.);

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [28];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,35 \cdot 1,15 / (21 \cdot 8) = 73,93 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 73,93 \cdot 8,00 = 591,43 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, (грн.)	Величина оплати на робітника (грн.)
Монтаж-демонтаж дослідницької апаратури	8,00	3	1,35	73,93	591,43
Підготовка робочого місця розробника для проведення розробки і дослідження	7,50	2	1,10	60,24	451,79
Підготовка компонентів мікроелектронного пристрою	4,30	4	1,50	82,14	353,21
Монтаж компонентів мікроелектронного пристрою	8,00	4	1,50	82,14	657,14

Продовження таблиці 4.5

Налагодження мікроелектронного блоку	3,00	5	1,70	93,10	279,29
Формування бази даних розробки і дослідження	11,00	3	1,35	73,93	813,21
Налагодження програмних засобів проектування	2,50	5	1,70	93,10	232,74
Монтаж обладнання виведення результатів дослідження	1,35	3	1,35	73,93	99,80
Контроль протікання цифрового експерименту	6,50	4	1,50	82,14	533,93
Всього					4012,54

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доо}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доо}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доо}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доо}} = (41457,86 + 4012,54) \cdot 10 / 100\% = 4547,04 \text{ (грн.)}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (41457,86 + 4012,54 + 4547,04) \cdot 22 / 100\% = 11003,84 \text{ (грн.)}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Мікроелектронні тензOMETричні перетворювачі».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, (грн/кг);

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, (грн/кг.)

$$M_1 = 2,0 \cdot 213,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 447,30 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір Maestro standard Plus A4-500-80	213,00	2,0	0	0	447,30
Папір для записів Maestro standard Light A5	80,00	4,0	0	0	336,00
Органайзер офісний Maestro standard Office	120,00	3,0	0	0	378,00
Канцелярське приладдя Maestro standard (набір офісного працівника)	205,00	3,0	0	0	645,75
Картридж для принтера HP laserJet	1080,00	1,0	0	0	1134,00

Продовження таблиці 4.6

Диск оптичний Maestro standard CD-RW	25,00	4,0	0	0	105,00
Flesh-пам'ять Maestro standard 64 GB	206,00	1,0	0	0	216,30
Тека для паперів Maestro standard BOX	46,00	4,0	0	0	193,20
Всього					3455,55

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» відсутні.

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення. Витрати за статтею відсутні.

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.8)$$

де C_{inprz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 350,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 367,50 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	350,00	367,50
Система імітаційного комп'ютерного моделювання SIMULINK програмного середовища MATLAB	1	5600,00	5880,00
Система керування реляційними базами даних MySQL	1	9500,00	9975,00
Всього			24843,00

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{об}}{T_{с}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.9)$$

де C_6 – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_6 – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (42899,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 2383,28 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, (грн.)	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, (грн.)
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі ПК HP i7-JD3200-UA23	42899,00	3	2	2383,28

Продовження таблиці 4.8

Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w c Wi-Fi (G3Q35A)	7499,00	4	2	312,46
Робоче місце інженера- дослідника спеціалізоване	7700,00	5	2	256,67
Офісна оргтехніка	8990,00	5	2	299,67
Приміщення лабораторії досліджень	629000,00	25	2	4193,33
ОС Windows 11	8460,00	3	2	470,00
Пакет Microsoft Office 2019	7840,00	3	2	435,56

Продовження таблиці 4.8

Маршрутизатор Asus ZenWiFi AX Mini XD4 3PK White (90IG07M0- MO3C40)	9029,00	4	2	376,21
Всього				8727,17

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.10)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ (грн.);

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,36 \cdot 160,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 632,45 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, (грн.)
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі ПК HP i7-JD3200-UA23	0,36	160,0	632,45
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w c Wi-Fi (G3Q35A)	0,25	4,0	10,98
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	0,07	160,0	122,98
Офісна оргтехніка	0,45	1,3	6,42
Маршрутизатор Asus ZenWiFi AX Mini XD4 3PK White (90IG07M0-MO3C40)	0,02	160,0	35,14

Продовження таблиці 4.9

Сервер бази даних на основі ПЕОМ Комп'ютер ARTLINE Overlord X81WHITE (X81WHITEv23)	0,32	160,0	562,18
Всього			1370,14

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.11)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 0\%$.

$$B_{cv} = (41457,86 + 4012,54) \cdot 0 / 100\% = (0,00) \text{ грн.}$$

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.12)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 0\%$.

$$B_{cn} = (41457,86 + 4012,54) \cdot 0 / 100\% = 0,00 \text{ (грн.)}$$

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_s = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де H_{is} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо $H_{is} = 50\%$.

$$I_{\text{в}} = (41457,86 + 4012,54) \cdot 50 / 100\% = 22735,20 \text{ (грн.)}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (41457,86 + 4012,54) \cdot 100 / 100\% = 45470,40 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}} + Z_{\text{н}} + M + K_{\text{в}} + B_{\text{спец}} + B_{\text{прз}} + A_{\text{обл}} + B_{\text{е}} + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_{\text{в}} + B_{\text{нзв}}. \quad (4.15)$$

$$B_{\text{заг}} = 41457,86 + 4012,54 + 4547,04 + 11003,84 + 3455,55 + 0,00 + 0,00 + 24843,00 + 8727,17 + 1370,14 + 0,00 + 0,00 + 22735,20 + 45470,40 = 167622,73 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$ЗВ = 167622,73 / 0,95 = 176444,98 \text{ (грн.)}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.17)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, (тис. грн.) Прийmemo $B = 176444,98$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [28].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 176,4 \cdot 0,08 = 34,82.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» складають 176444,98 (грн.) Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз літературних джерел, проаналізовано типи та види тензодатчиків, наведено приклади розрахунку та виготовлення тензодатчиків. Розглянуто та проаналізовано тензометричні перетворювачі, їх види та типи. Розглянуто види деформації тензодатчиків в перетворювачах. Проведено аналіз елементів згинання та пружинних елементів та проведено порівняння їх переваг та недоліків. Запропоновано можливості підвищення продуктивності роботи тензометричних перетворювачів. Проведено математичне моделювання тензометричної системи вимірювання. В результаті моделювання було отримано осцилограми вихідних характеристик фактичного та вимірюваного значення при різних значеннях. Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» складають 176444,98 (грн.) Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронні тензометричні перетворювачі» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hooke, Robert: De potentia restitutiva. London 1678.
2. Wheatstone, Charles: An Account of several new Instruments and Processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1843.
3. Thomson, William: On the Electro-dynamic Qualities of Metals. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1856.
4. Tatnall, F.G.: Tatnall on Testing. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA, 1966.
5. USA Patent No. 2 292 549, Title: Material Testing Apparatus, date filed: 23rd February 1940, date issued: 11th August 1942.
6. British Patent No. 728,606, Title: Electric Resistance Devices, date filed: 28th August 1952, date issued: 20th April 1955.
7. Ort; W.: Eine neue Technologie zur Herstellung von Dünnschicht-Dehnungsmeßstreifen für den Aufnehmerbau. Messtechnische Briefe 13 (1977) No. 1, pp 7- 11. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
8. Bray, A., and P. Valabrega: The strain sensitivity of Nichrome Films prepared by vacuum deposition. Presentation at 2me Conference D'Analyse des Contraintes, Paris 1962
9. Bray, A., and M. Plassa: The strain sensitivity of Ge and Cr-Si Thin-Films deposited under Vacuum. Presentation at IMEKO Conference, Stockholm 1964.
10. Watanabe, O. and K. Shioda: Meßtechnische Eigenschaften von Dünnschicht-Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen. Materialprüfung 9 (1967) No. 6, pp 223-227.

11. Schulz, M.: Einsatz kapazitiver Dehnungsmeßstreifen für statische Messungen bei hohen Temperaturen. VDI-Berichte No. 313 (1978), pp 317-322. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
12. Schulz, M.: Statische Dehnungsmessung bei 500°C über 10720 Stunden zur Bestimmung von Materialkonstanten. VDI-Berichte No. 439 (1982), pp 155- 159, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
13. Fortmann, M.: Hochtemperatur-Dehnungsmessungen mit dem neuen kapaziti ven Meßgeber von Interatom. VDI-Berichte No. 514 (1984), pp 45-48, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
14. Böhm, W., P. Hofstötter and N. Rasche: Laboruntersuchungen zum Lang zeitverhalten kapazitiver Dehnungsmeßstreifen CERL-Planer und Interatom bei Temperaturen bis 550°C. VDI-Berichte No. 552 (1985), pp 97-111. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
15. Procter, E.: High temperature creep strain measurements using a capacitance type strain gauge. VDI-Berichte No. 514 (1984) pp 101-107
16. Tatnall, F.G.: Development of the Scratch Gage. Experimental Mechanics, June 1969, pp 27N-34N
17. Bertodo, R.: Development of High-temperature Strain Gauges, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 173 (1959) No. 23, pp 605-616, London
18. Greger, G.: Zur Herstellung von Siliziumkristallen nach dem Czochzralsky Verfahren. Z. f. angew. Physic (1961) No. 1, pp 47-51.
19. Anon.: Silicon Semiconductor Strain Gauges. Magazine Direct Current, Sept. 1962, pp 235-237
20. VDI/VDE-Richtlinie 2653, Page 1: Dehnungsmeßstreifen mit metallischem Meßgitter. Kenngrößen und Prüfbedingungen. August 1974, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin and Cologne.

21. Hoffmann, K.: Zur Herstellung moderner Folien-Dehnungsmeßstreifen und den dabei gegebenen Korrekturmöglichkeiten für Kriechen und Querempfindlichkeit. Messtechnische Briefe 22 (1986) No. 2, pp 41-46. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
22. Caris, R.F.: Strain Gages in Hard Vacuum, Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Spring Meeting 1968, pp 29-35.
23. Telinde, J.: Strain Gages in Cryogenics and Hard Vacuum. Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Spring Meeting 1968, pp 45-54.
24. ТЕНЗОДАТЧИКИ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ. [Електронний ресурс] – <https://asvik.kiev.ua/ua/articles/5>
25. Що таке тензодатчик і як він працює [Електронний ресурс] - <http://obrii.com.ua/main/19502-shho-take-tenzodatchik-i-yak-vin-pratsyuye.html>
26. Конспект лекцій з дисципліни “МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ”/ укладач Н.М.Опанасюк.— Суми : Сумський державний університет, 2013. – 102 с.
27. I. Measurements Group. Technical Staff. TA413.5.S85 1988 620.1'123'0287 88-12702 ISBN 0-9619057-0-0 (pbk.)
28. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

МІКРОЕЛЕКТРОННІ ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Виконав: студент 2-го курсу, групи МНТ-23м
спеціальності 176 – Мікро- та наносистемна
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Муравський О.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

 Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 12 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

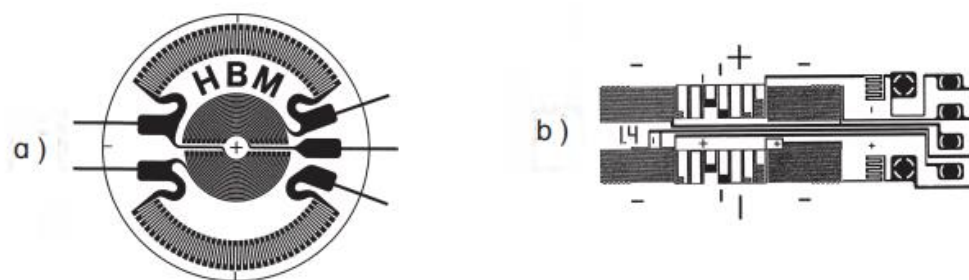


Рисунок 1 - Приклади конструкції тензодатчика в технології травлення фольгою: а) розетка діафрагми з чотирьох частин у конфігурації моста для перетворювачів тиску, б) повна схема моста тензодатчика, включаючи всі з'єднання та компенсаційні елементи

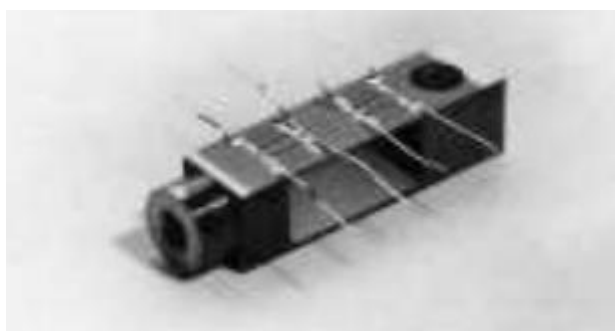


Рисунок 2 - Тонкоплівковий тензодатчик на пружинному корпусі перетворювача

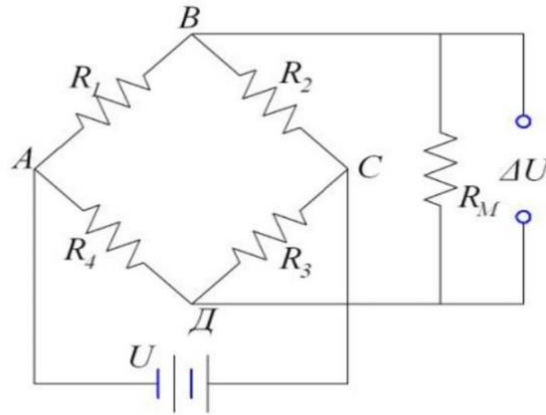


Рисунок 3 - Схема підключення «Міст Уінстона»



Рисунок 4 - Структура математичної моделі тензометричної системи вимірювання

```
>> function Ucal = f(E) % де E=модуль пружності тензодатчика
R=100; % Опір резисторів моста Уінстона
k=2; % Калібровочний коефіцієнт тензодатчика
Uin=10; % Напруга джерела живлення тензодатчика
dR=k*100*E; % Похибка опору тензодатчика при деформації
Rstr=R+dR; % Опір, який з'являється при деформації резистора тензодатчика
Uout=Uin*(Rstr/(Rstr+R))-R/(R+R); % Вихідна напруга тензометричної системи
Kgaun=0.2 % Коефіцієнт підсилення в підсилювачі для масштабування схеми
Us=Uout*Kgain; % Масштабована вихідна напруга тензометричної системи
end
```

Рисунок 5 - Математична модель вихідної напруги тензометричної системи

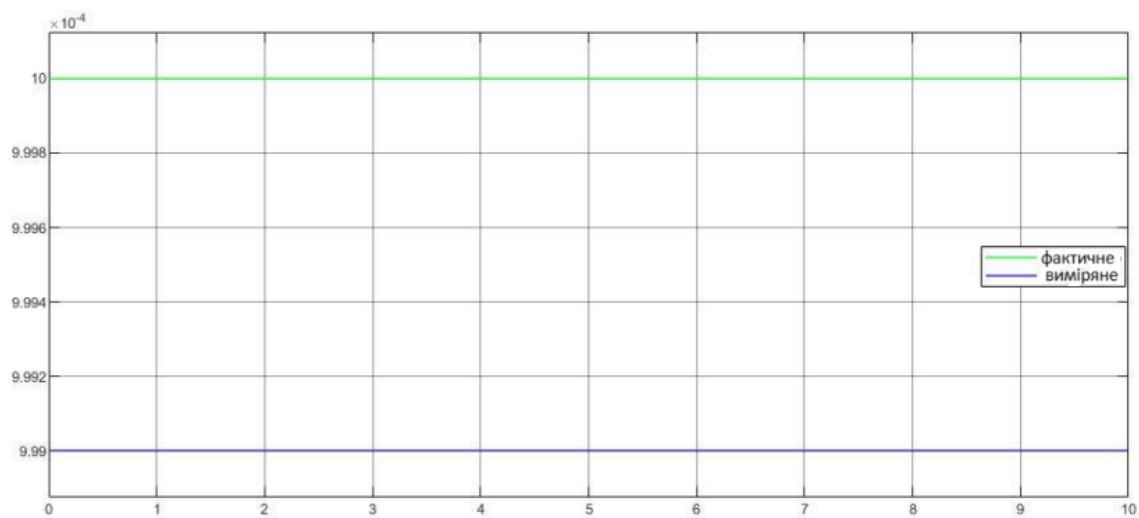


Рисунок 6 - Вихідні характеристики постійного значення

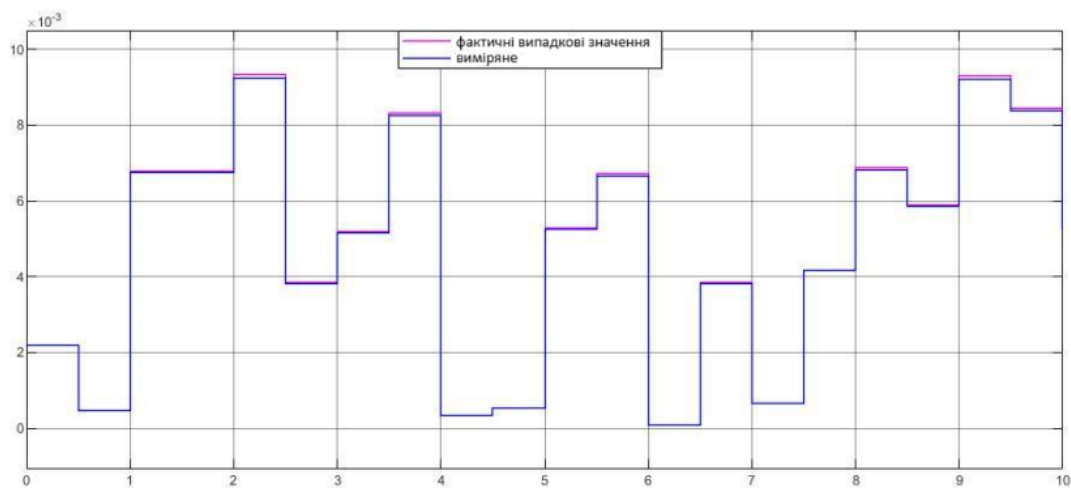


Рисунок 7 - Імітація статичного вимірювання за допомогою блока
рівномірних випадкових значень

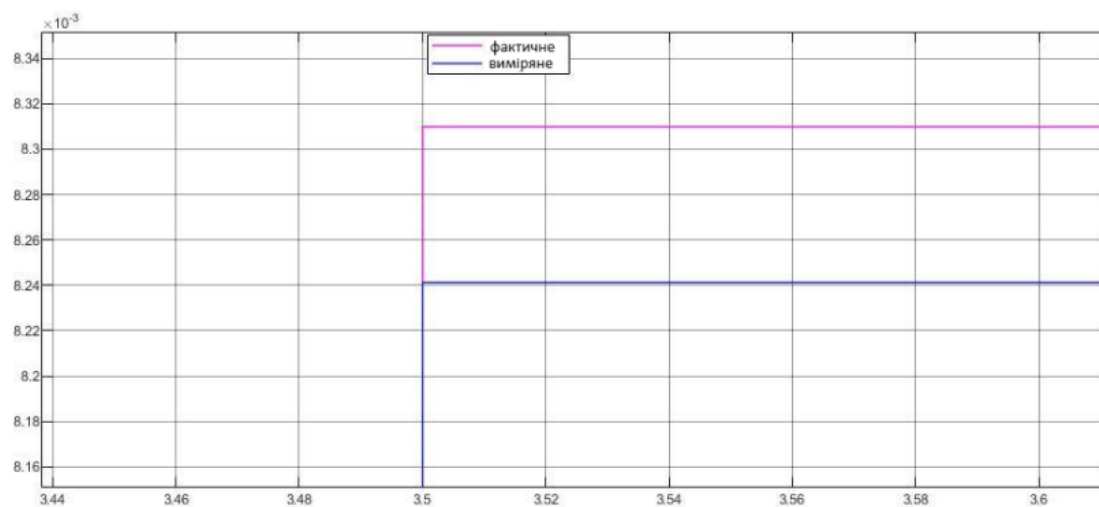


Рисунок 8 - Імітація статичного вимірювання за допомогою блока рівномірних випадкових значень в приближеному вигляді

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

МІКРОЕЛЕКТРОННІ ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Мікроелектронні тензOMETричні перетворювачі»

Тип роботи: МКР
(БДР, МКР)

Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність 97,0% Схожість 3,0%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Андрій СЕМЕНОВ
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Turnitin щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Олександр МУРАВСЬКИЙ
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Олександр ОСАДЧУК
(прізвище, ініціали)