

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))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА»

Виконав: студент 4-го курсу, групи KIBT-216
спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка, ОП – Комп'ютеризовані
інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Костюк В.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

Рецензент: доц. каф. ІКСТ, к.т.н., доц.

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«13» 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

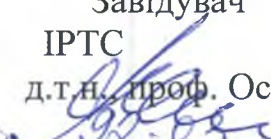
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти І-й (бакалаврський)
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма Комп'ютеризовані інформаційно-
вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 2025 року

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Костюку Віталію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Засіб вимірювання деформації твердого тіла»
керівник роботи Дудатьєв Ігор Андрійович к.т.н. доц., каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” 03 2025 р. № 97

2. Строк подання студентом роботи 12 06 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Метод вимірювання – тензорезистивний. Тип ЗВТ – засіб вимірювання. Об'єкт контролю – деформація твердого тіла. Програмна реалізація на мові – С.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Особливості засобів та методів вимірювання деформації твердого тіла як об'єкта дослідження. Розробка чутливого елемента та рівняння перетворення засобу вимірювання деформації твердих об'єктів. Апаратна та програмна реалізація засобу вимірювання деформації. Метрологічне забезпечення засобу вимірювання деформації. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Енергетична діаграма при одновісній деформації кристалу кремнію. Структурна схема металічних тензорезисторів. Конструкція фольгових металічних тензорезисторів. Схема дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів. Послідовна схема включення тензорезистора. Диференціальна схема включення тензорезистора. Мостова схема включення тензорезистора. Абстрактна візуалізація чутливого елемента засобу контролю деформації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС К.Т.Н. Дудатьєв ІА.		

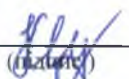
7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2025-26.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	02.06.2025-06.06.2025	
8.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
9.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
10.	Захист БДР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент

Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

Костюк В.Ю.

Дудатьєв І.А.

АНОТАЦІЯ

УДК 629

Костюк В.Ю. Засіб вимірювання деформації твердого тіла. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 67 с. На українській мові. Бібліогр.: 18 назв; табл.: 1; рис. 8.

У бакалаврській роботі представлено розробку засобу вимірювання деформації твердих тіл на основі тензорезистивного сенсора та мікроконтролера ATmega328P. Проведено огляд існуючих методів вимірювання деформацій, серед яких особливу увагу приділено резистивним тензодатчикам і мостовим схемам, що забезпечують високу точність та термокомпенсацію.

Розроблено математичну модель процесу перетворення механічної деформації в електричний сигнал, використовуючи закон Гука та тензометричне рівняння. Побудовано структурну схему пристрою, яка включає чутливий елемент, мостову схему Вістона, інструментальний підсилювач, АЦП, мікроконтролер та інтерфейс виведення результатів. Особливу увагу приділено температурній компенсації, фільтрації шумів та оптимізації електричної частини системи.

Апаратна реалізація виконана на основі мікроконтролера ATmega328P з використанням LCD-дисплея для відображення результатів вимірювання у мікрострейнах. Програмне забезпечення розроблено мовою C (Arduino), воно реалізує зчитування аналогового сигналу, обчислення деформації та вивід результатів у режимі реального часу.

Отриманий пристрій є компактним, енергоефективним та точним інструментом для вимірювання механічних деформацій, що може бути використаний у лабораторних дослідженнях, інженерній практиці та навчальних цілях.

Ключові слова: тензорезистор, засіб вимірювання, деформація, метрологічні характеристики, чутливість.

ABSTRACT

B.Y. Kostuk. Device for measuring the deformation of a solid body. Bachelor's Thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 67 p. In Ukrainian. Bibliography: 18 titles; tables: 1; figures: 8.

This bachelor's thesis presents the development of a deformation measurement device for solid bodies based on a strain gauge sensor and the ATmega328P microcontroller. A comprehensive review of existing deformation measurement methods is provided, with particular attention given to resistive strain gauges and bridge circuits, which offer high accuracy and effective temperature compensation.

A mathematical model of the mechanical-to-electrical signal conversion process is developed using Hooke's Law and the strain gauge equation. A structural diagram of the device is proposed, comprising a sensitive element, a Wheatstone bridge, an instrumentation amplifier, an ADC, a microcontroller, and an output interface. Special focus is placed on temperature compensation, noise filtering, and optimization of the electrical components.

The hardware implementation is based on the ATmega328P microcontroller, with an LCD used to display deformation results in microstrain ($\mu\epsilon$). The software, written in C (Arduino), performs analog signal reading, deformation calculation, and real-time result output.

The resulting device is compact, energy-efficient, and accurate, making it suitable for laboratory research, engineering applications, and educational purposes.

Keywords: strain gauge, measuring device, metrological characteristics, sensitivity.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА ЯК ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Фізичне представлення та суть деформації твердого тіла	10
1.2 Огляд та аналіз методів вимірювання деформацій.....	13
1.2.1 Механічні методи вимірювання деформації твердого тіла.....	13
1.2.2 Оптичні методи вимірювання деформації твердого.....	14
1.2.3 Електричні методи вимірювання деформації твердого тіла.....	17
1.2.4 П’єзоелектричні методи вимірювання деформації твердого.....	19
1.2.5 Акустичні методи вимірювання деформацій твердого тіла.....	21
1.2.6 Магнітні та індукційні методи вимірювання деформацій.....	22
1.3 Систематизація методів вимірювання деформацій твердого тіла та вибір оптимального.....	23
1.4 Висновки до розділу.....	28
2 РОЗРОБКА ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ТА РІВНЯННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДИХ ОБ’ЄКТІВ.....	29
2.1 Огляд готових рішень вимірювання деформацій твердих об’єктів..	29
2.2 Розробка рівняння перетворення засобу вимірювання деформації..	31
2.3 Розробка структурної схеми засобу вимірювання деформації.....	34
2.4 Висновки до розділу.....	37
3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ.....	39
3.1. Апаратна реалізація засобу вимірювання деформації на основі ATmega328.....	39

3.2 Програмна реалізація засобу вимірювання деформації	43
3.3 Висновки до розділу 3	45
4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ	
ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ	47
4.1 Теоретичний аналіз основних метрологічних характеристик засобу вимірювання деформації	47
4.2 Експериментальна перевірка роботи та розрахунок основних метрологічних характеристик засобу вимірювання деформації	49
4.3 Перспективи подальших тензометричних досліджень	52
4.4 Висновки до розділу	53
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
Додаток А (Обов’язковий) Ілюстративна частина	60
Додаток Б (Обов’язковий) Протокол перевірки роботи	64
Додаток В (Довідниковий) Лістинг програми	66

ВСТУП

Актуальність.

Механічна діагностика і безпека конструкцій є основою інженерного забезпечення у машинобудуванні, авіації, мостобудуванні, енергетиці та багатьох інших сферах. Виявлення змін у структурі матеріалів та елементів, що зазнають навантажень, є критичним для запобігання аваріям і забезпечення надійності експлуатації.

Сучасне будівництво та промислове виробництво стикаються зі зростаючими вимогами до контролю механічного стану конструкцій у реальному часі. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні точних, компактних і економічно доступних засобів вимірювання, здатних фіксувати малі деформації з високою роздільною здатністю.

Тензометричний метод, що базується на зміні електричного опору тензорезисторів під впливом деформації, є одним із найпоширеніших і найбільш практичних способів вимірювання деформацій. Цей метод дозволяє створити надійні, малогабаритні сенсори, інтегровані з мікроконтролерами, які здатні проводити обчислення у реальному часі, виводити результати на дисплей або передавати їх на зовнішні системи.

Додаткову актуальність темі надає розвиток систем моніторингу стану конструкцій (SHM — Structural Health Monitoring), в яких тензометричні датчики є ключовими елементами. Вони дозволяють здійснювати довготривале спостереження за об'єктами без втручання в їхню структуру, що особливо важливо в умовах обмеженого доступу або високої відповідальності.

Таким чином, розробка засобу вимірювання деформації твердого тіла з використанням тензометричного методу є важливою інженерною задачею, що має як практичну, так і наукову цінність.

Метою роботи є розробка засобу вимірювання деформації твердого тіла на основі електротензометрії із цифровою обробкою.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі задачі:

- аналіз методів вимірювання деформації і вибір найбільш доцільного для практичного застосування;
- побудова функціональної та структурної схеми засобу вимірювання;
- розробка алгоритму обробки вимірювального сигналу;
- створення програмного забезпечення для мікроконтролера з виведенням результатів вимірювання;
- розрахунок метрологічних характеристик засобу.

Об'єктом дослідження в роботі є процес вимірювання механічної деформації конструкційних матеріалів у лабораторних і польових умовах.

Предметом дослідження є електротензометричні методи вимірювання та побудова пристрою, що реалізує вимірювання і обробку деформаційного сигналу.

Методи дослідження. У роботі були використані методи теорії вимірювань, аналізу похибок, мікропроцесорної техніки, математичної статистики та комп'ютерного моделювання. Теоретичні розрахунки поєднувалися з практичною реалізацією схеми, програмуванням мікроконтролера та експериментальною перевіркою достовірності результатів.

Практичне значення одержаних результатів.

У роботі отримані такі практичні результати:

1. Розроблено структурну та функціональну схеми вимірювального засобу на основі тензометричного методу, що можуть

бути використані як основа для створення реального пристрою з вимірювання механічних деформацій у лабораторних та промислових умовах.

2. Реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера ATmega328P, яке забезпечує зчитування сигналу з тензорезистивного моста, його обробку, розрахунок деформації та виведення результату на цифровий дисплей. Це дозволяє використовувати прилад як автономний вимірювальний модуль.

3. Визначено основні метрологічні характеристики засобу: чутливість, похибку, роздільну здатність, діапазон вимірювання. Це дозволяє провести попередню оцінку точності приладу й адаптувати його під конкретні технічні завдання.

4. Проведено технічне обґрунтування вибору сенсора та методів підсилення сигналу, що дає змогу інтегрувати систему у вже існуючі механічні чи будівельні об'єкти для моніторингу стану матеріалів або конструкцій.

5. Розроблений засіб може бути використаний у навчальному процесі для демонстрації принципів тензометрії, а також у практичних курсах із електроніки, метрології та автоматизованих систем керування.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що представлені в роботі, одержані автором самостійно.

1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Фізичне представлення та суть деформації твердого тіла

Деформація твердого тіла — це зміна форми або розмірів об'єкта під дією зовнішніх навантажень. У контексті механіки і матеріалознавства деформації поділяються на пружні (оборотні) та пластичні (необоротні). Вивчення і вимірювання цих деформацій має критичне значення для конструювання та експлуатації інженерних споруд, машин, приладів і матеріалів.

Контроль деформацій дозволяє не лише оцінити міцність і надійність конструкцій, а й вчасно виявити дефекти, порушення технології або потенційні зони руйнування. Засоби вимірювання деформацій поділяються за принципом дії, точністю, способом встановлення на об'єкт, а також за можливістю дистанційного зчитування інформації.

Методи вимірювання деформацій [1-4]:

1. Механічні методи. До них належать індикатори, важільні системи, тензометри зі стрілковими покажчиками. Принцип дії полягає у зміні положення елементів при розтягуванні або стисканні об'єкта. Цей метод відносно простий, проте не дозволяє отримати високу точність і придатний лише для лабораторних умов або неінтенсивного польового застосування.

2. Оптичні методи. Сюди відносяться тіньовий метод, інтерферометрія, метод фотограмметрії, цифрова кореляція зображень (DIC). Ці методи мають високу точність і не вимагають безпосереднього контакту з тілом. Недоліком є висока вартість обладнання та складність обробки результатів.

3. Електричні методи (тензометрія). Найбільш поширеним у сучасній практиці є метод опору — електротензометрія. На поверхню зразка наклеюють тензорезистор, який змінює свій опір у відповідь на деформацію. Такі перетворення фіксуються відповідними схемами та дають змогу точно вимірювати деформації з високою роздільною здатністю. Цей метод є компактним, чутливим, універсальним і недорогим — що робить його оптимальним для більшості інженерних застосувань.

4. П'єзоелектричні методи. Використовують п'єзокристали, які генерують електричний заряд під дією деформації. Застосовуються переважно для вимірювання динамічних навантажень, наприклад, у вібраційних системах або при дослідженнях короткочасних імпульсних навантажень.

5. Акустичні методи. Передбачають аналіз зміни швидкості або частоти проходження ультразвукових хвиль через тіло, що деформується. Використовуються для моніторингу великих конструкцій (наприклад, мостів, гребель), але є складними у реалізації та потребують спеціального аналізу.

6. Магнітні та індукційні методи. Ґрунтуються на зміні магнітного потоку або індукції у тілі, що зазнає деформації. Ці методи мають обмежене застосування, найчастіше — у поєднанні з іншими.

Огляд засобів вимірювання. Серед найбільш поширених пристроїв для вимірювання деформації можна виділити:

Резистивні тензодатчики (наприклад, SR-4, Kyowa, HBM) — є найбільш вживаним типом датчиків у лабораторній та польовій практиці. Вони працюють за принципом зміни електричного опору при деформації провідника або напівпровідника, прикріпленого до поверхні досліджуваного об'єкта. Характеризуються високою точністю та відносною простотою використання.

Оптоволоконні тензометри — використовують зміни властивостей світлової хвилі, що проходить через оптоволокно, внаслідок деформації. Такі системи мають високу стійкість до електромагнітних завад, підходять для роботи в екстремальних умовах, а також дозволяють здійснювати довготривалі моніторингові дослідження на великих об'єктах, таких як мости, тунелі або греблі.

Інтерферометри — оптичні прилади, що дозволяють вимірювати надзвичайно малі деформації (у нанометрах), засновані на інтерференції світлових хвиль. Вони застосовуються переважно в дослідженнях матеріалів, нанотехнологіях та в умовах, де потрібна надвисока точність вимірювань.

Цифрові оптичні системи (DIC — Digital Image Correlation) — сучасна безконтактна технологія, яка дозволяє отримувати повне поле деформацій на поверхні об'єкта шляхом аналізу послідовних зображень. Вона широко використовується в механіці руйнування, біомеханіці, авіаційній та автомобільній промисловості.

П'єзоелектричні сенсори типу Kistler — працюють на основі п'єзоелектричного ефекту, при якому механічна деформація матеріалу призводить до появи електричного заряду. Вони ідеально підходять для вимірювання швидкоплинних процесів, вібрацій і ударних навантажень.

Ультразвукові дефектоскопи з функцією аналізу деформацій — поєднують методи неруйнівного контролю з можливістю відстеження змін у структурі матеріалу внаслідок навантаження. Вони дозволяють не лише виявляти внутрішні дефекти, але й визначати їх вплив на механічну поведінку конструкції в реальному часі.

Ці засоби вимірювання деформацій відіграють ключову роль у діагностиці технічного стану матеріалів та конструкцій, дозволяючи підвищити їхню надійність, безпечність та експлуатаційну ефективність.

1.2 Огляд та аналіз методів вимірювання деформацій

1.2.1 Механічні методи вимірювання деформації твердого тіла

Механічні методи є одними з найдавніших і найпростіших способів визначення деформацій у твердих тілах. Їх основна ідея полягає у безпосередньому вимірюванні переміщень, змін довжини або прогинів, які виникають у матеріалі або конструкції під дією навантаження. Такі методи зазвичай базуються на спостереженні за зміною геометричних параметрів зразка або елементів вимірювального пристрою, що жорстко з'єднані з об'єктом дослідження.

Основні види механічних методів:

1. Індикаторні пристрої (стрілочні індикатори переміщень). Це найпростіші пристрої, які дають змогу фіксувати лінійні переміщення. Найчастіше використовуються:

- Індикатори годинникового типу — містять механічну систему передачі руху від вимірювального стрижня до стрілки, що обертається по шкалі.
- Індикатори з контактним важелем — використовуються при обмеженому доступі до зони деформації. Такі пристрої забезпечують точність у межах 0,01 мм, але не мають високої чутливості і потребують стабільної опори та контролю температурного фону.

2. Механічні тензометри. В основі лежить вимірювання зміни довжини тіла або зразка з використанням важеля, гвинтової передачі або механічного компаратора. Такі тензометри є досить грубими, їх точність — від 1% до 5%, але вони мають перевагу простоти та незалежності від джерел живлення. Часто застосовуються у навчальних цілях або для попереднього контролю.

3. Механічні екстензометри. Екстензометр — пристрій, який вимірює подовження зразка між двома точками. Найпростіші варіанти — це рамки з шарнірними елементами, які фіксують деформацію через лінійні переміщення частин механізму. Механічні екстензометри поділяються на:

- Контактні — з безпосереднім прикладанням до зразка;
- Безконтактні — використовують оптичні або лазерні елементи (перехідна форма до оптичних методів).

Використовуються переважно при дослідженні пружних властивостей матеріалів, зокрема в лабораторіях випробування металів. Механічні методи вимірювання деформації залишаються актуальними у випадках, коли потрібні прості, дешеві, автономні пристрої. Однак, для високоточних вимірювань, де має значення мала деформація або динамічне навантаження, вони значно поступаються електричним і оптичним методам. Тому в сучасній інженерній практиці механічні методи здебільшого використовуються як допоміжні або для грубого первинного контролю.

1.2.2 Оптичні методи вимірювання деформації твердого

Оптичні методи вимірювання деформації твердого тіла є сучасними та точними технологіями, які використовують властивості світла для визначення змін форми або розмірів об'єкта. Вони особливо корисні у випадках, коли необхідно проводити вимірювання без контакту з об'єктом, або коли об'єкт розміщено у важкодоступному або агресивному середовищі. Оптичні методи дозволяють отримувати велику кількість інформації з високою роздільною здатністю, що робить їх дуже корисними для дослідження тріщин, мікрорухів та аналізу розподілу напружень і

деформацій.

Одним із найпростіших оптичних методів є метод тіньових мір. Він базується на порівнянні тіней або контурів до і після деформації. На поверхню об'єкта наносяться мітки або шкали, які фотографуються до прикладення навантаження і після. Порівнюючи ці зображення, можна визначити зміни положення міток і оцінити деформацію. Цей метод є простим і недорогим, проте не забезпечує високої точності та підходить переважно для грубих або попередніх вимірювань.

Інтерференційні методи ґрунтуються на явищі інтерференції світлових хвиль, коли дві або більше світлові хвилі накладаються одна на одну і створюють характерні смуги. Розташування цих смуг залежить від змін форми або положення поверхні. Одним з найбільш точних варіантів є голографічна інтерферометрія, яка дозволяє створювати тривимірне зображення поверхні об'єкта та фіксувати навіть дуже малі деформації. Такі методи мають надзвичайно високу точність, але потребують дуже точного налаштування та стабільного середовища без вібрацій.

Фотограмметрія — це метод, при якому об'єкт знімається на фотоапарат з кількох позицій, після чого зображення обробляються для отримання просторової моделі об'єкта. Цей метод дозволяє досліджувати великі об'єкти, наприклад будівлі чи мости. У сучасному варіанті фотограмметрія є цифровою і базується на програмному аналізі зображень. Вона має помірну точність, проте дозволяє ефективно аналізувати зовнішні зміни форми.

Найбільш досконалим і універсальним на сьогодні є метод цифрової кореляції зображень. Суть методу полягає у тому, що на поверхню об'єкта наносяться випадкові чорні цятки або візерунки, які після навантаження знову фотографуються. Програма порівнює положення кожної ділянки поверхні на обох зображеннях і визначає, як саме вона

змістилася. Це дозволяє побудувати карту деформацій по всій площі поверхні, а не лише у кількох точках. Метод є точним, не потребує контакту, підходить для об'єктів будь-якої форми, але потребує якісної оптики, стабільного освітлення і спеціального програмного забезпечення.

Оптичні методи мають багато переваг. Вони не потребують фізичного контакту з об'єктом, дозволяють досліджувати великі площі і отримувати тривимірні поля деформацій. Такі методи є дуже точними, особливо у випадках з мікроскопічними деформаціями. Також вони ідеально підходять для роботи з об'єктами, до яких неможливо прикріпити датчик або прилад.

Проте є й обмеження. Більшість оптичних методів вимагають дорогого обладнання і стабільних умов. Наприклад, вібрації або зміни освітлення можуть спотворити результати. Крім того, обробка отриманих даних часто потребує спеціалізованого програмного забезпечення і досвіду.

Оптичні методи застосовуються в авіаційній, автомобільній промисловості, у матеріалознавстві, біомеханіці, медицині, архітектурі, при моніторингу старих будівель. Вони дозволяють дослідникам аналізувати поведінку матеріалів під навантаженням без порушення їх структури або впливу на результати.

У підсумку можна сказати, що оптичні методи займають важливе місце серед сучасних засобів вимірювання деформацій. Вони особливо цінні там, де потрібна висока точність і деталізація, а також коли фізичний контакт з об'єктом неможливий або небажаний. Найбільш перспективним на сьогодні є метод цифрової кореляції зображень, який поєднує точність, гнучкість та можливість використання у широкому спектрі застосувань.

1.2.3 Електричні методи вимірювання деформації твердого тіла

Електричні методи вимірювання деформації, насамперед тензометрія, є одними з найпоширеніших і найефективніших у сучасній практиці контролю напружено-деформованого стану твердих тіл. Вони базуються на тому, що електричний опір провідника змінюється при його деформації. Вимірюючи зміну цього опору, можна визначити величину деформації, яку зазнає матеріал або конструкція.

Основним елементом тензометричного методу є тензорезистор — тонка провідникова або напівпровідникова смужка, яка приклеюється до поверхні зразка або деталі. Під час деформації об'єкта тензорезистор розтягується або стискається разом із ним, внаслідок чого змінюється його довжина та поперечний переріз, а отже — і електричний опір. Ця зміна фіксується за допомогою електричних схем, найчастіше — мостової схеми Вітстона.

Чутливість тензорезистора до деформації характеризується коефіцієнтом тензочутливості. Цей коефіцієнт показує, на скільки зміниться опір приладу при зміні довжини. Для металевих тензорезисторів він зазвичай становить від 1,5 до 2,5, для напівпровідникових — значно вищий, що дозволяє досягати більшої точності, але водночас зростає і чутливість до температурних впливів.

Електричні тензометри можуть бути одноканальними або багатоканальними. Одноканальні використовуються для контролю деформації в одному напрямку, тоді як багатоканальні дають змогу вимірювати деформації у кількох напрямках одночасно. Також існують тензометри з повним мостом, які забезпечують вищу точність та стійкість до зовнішніх збурень, зокрема температурних змін.

Однією з головних переваг електричної тензометрії є висока

точність. Вона дозволяє фіксувати деформації величиною в кілька мікрострейнів (одиниця вимірювання деформації, що дорівнює 10^{-6}). Такий рівень точності дуже важливий при дослідженні напружень у відповідальних елементах конструкцій, зокрема у літакобудуванні, мостах, турбінах та суднах.

Іншою важливою перевагою є компактність і легкість таких систем. Тензорезистори мають малі розміри і можуть бути встановлені на складні поверхні або у важкодоступні місця. До того ж, електричні сигнали можна легко передавати, обробляти, записувати і використовувати для автоматизованого моніторингу конструкцій у реальному часі.

Однак електричні методи мають і певні обмеження. Зокрема, вони чутливі до температурних впливів, тому часто застосовують компенсаційні тензорезистори або спеціальні схеми для усунення температурної похибки. Також тензорезистори потребують якісного монтажу — ідеального зчеплення з матеріалом, точного розміщення та правильного орієнтування відносно осі навантаження. У разі порушення технології встановлення можуть виникати значні похибки.

Електричні методи тензометрії застосовуються дуже широко. У машинобудуванні вони використовуються для контролю деформацій елементів шасі, двигунів, опор. У будівництві — для моніторингу стану балок, колон, перекриттів, фундаментів. У медицині — для створення чутливих сенсорів у протезуванні або вимірюванні біомеханічних характеристик. У науці — для експериментальних досліджень властивостей матеріалів та перевірки теоретичних моделей.

У підсумку можна зробити висновок, що електричні методи вимірювання деформації, зокрема тензометрія, поєднують у собі точність, надійність, доступність і гнучкість у використанні. Саме тому вони є одним із найпоширеніших і найоптимальніших способів контролю

деформацій у сучасній техніці та науці. Вони ідеально підходять для автоматизованих систем діагностики, тривалого моніторингу та досліджень матеріалів в умовах змінних навантажень.

1.2.4 П'єзоелектричні методи вимірювання деформації твердого

П'єзоелектричні методи вимірювання деформації твердого тіла ґрунтуються на явищі п'єзоелектричного ефекту. Це фізичне явище полягає в тому, що деякі кристалічні матеріали, наприклад кварц, титанат барію або титанат цирконату свинцю, при механічній деформації утворюють електричний заряд на своїй поверхні. І навпаки — при подачі електричного потенціалу вони можуть змінювати свої розміри. Саме ця властивість використовується для вимірювання механічних напружень, зокрема деформацій.

Суть методу полягає в тому, що п'єзоелектричний датчик закріплюється на тілі або вбудовується у конструкцію, яка піддається дії навантаження. Під час деформації матеріалу виникає тиск на кристал, у результаті чого на його поверхні з'являється електричний заряд. Цей заряд можна виміряти за допомогою спеціального електронного підсилювача. За величиною та характером заряду можна визначити амплітуду та частоту прикладеного навантаження.

Однією з головних переваг п'єзоелектричних методів є їхня висока чутливість до динамічних змін. Це означає, що вони здатні точно реєструвати швидкі та короточасні деформації, удари, вібрації, імпульсні навантаження. Саме тому ці датчики широко застосовуються в системах реєстрації вібрацій, контролю якості обробки матеріалів, дослідження руйнування конструкцій, ударних випробуваннях.

Ще однією перевагою п'єзоелектричних датчиків є їх компактність і

міцність. Вони добре працюють у складних умовах: при високих температурах, тисках, у хімічно агресивному середовищі. Такі сенсори можуть працювати протягом тривалого часу без втрати чутливості. Деякі з них не потребують зовнішнього джерела живлення, оскільки самі генерують електричний сигнал.

Проте п'єзоелектричні методи мають і свої обмеження. Найважливіше з них полягає у тому, що ці датчики не підходять для вимірювання повільних або сталих деформацій. Їх чутливість знижується при тривалому навантаженні, оскільки сигнал з часом спадає. Тому п'єзоелектричні сенсори використовуються переважно для аналізу змін, а не для постійного моніторингу стану об'єкта.

Крім того, сигнали від п'єзодатчиків мають низьку амплітуду і потребують підсилення та фільтрації. Це означає, що для обробки результатів потрібна складна електроніка, що може збільшити вартість системи. Також виникає потреба у спеціальному калібруванні, щоб точно перевести виміряний заряд у значення деформації або сили.

П'єзоелектричні методи активно використовуються в авіації, автомобілебудуванні, оборонній промисловості, машинобудуванні та наукових дослідженнях. Вони ефективні для аналізу резонансних частот деталей, виявлення ударних навантажень, тестування виробів на стійкість до вібрацій. У медицині п'єзодатчики застосовують у ультразвукових датчиках, а також для контролю механічного навантаження на протези та імпланти.

У підсумку можна сказати, що п'єзоелектричні методи є унікальними інструментами для вимірювання швидкоплинних, динамічних деформацій. Вони забезпечують високу чутливість, надійність та адаптивність до складних умов. Проте для довготривалого моніторингу повільних деформацій їх слід комбінувати з іншими методами, наприклад

електричною тензометрією або оптичними системами.

1.2.5 Акустичні методи вимірювання деформацій твердого тіла

Акустичні методи вимірювання деформацій засновані на використанні звукових хвиль для вивчення змін у матеріалі, які виникають через його деформацію. Ці методи застосовуються в різних галузях науки і техніки, зокрема для контролю за станом конструкцій, матеріалів, а також у процесах, де важливо визначити мікроскопічні зміни у структурі.

Принцип роботи акустичних методів. Акустичні методи базуються на вимірюванні змін в акустичних властивостях матеріалу, таких як швидкість звуку, амплітуда або частота звукових хвиль, які проходять через зразок. Коли матеріал деформується, його внутрішня структура змінюється, що впливає на звукові хвилі. Наприклад, зростання напруги може змінити швидкість поширення звукових хвиль, а також їх відображення від різних ділянок матеріалу.

Типи акустичних методів:

1. Метод ультразвукових хвиль. Ультразвукові хвилі є одним з найбільш поширених акустичних методів. У цьому методі використовують високочастотні звукові хвилі (зазвичай вище 20 кГц), які поширюються через матеріал. Ультразвукові датчики випромінюють хвилі і реєструють їх відбиття від внутрішніх дефектів чи змін у структурі матеріалу, таких як тріщини або пори. Зміни в часі відгуку або амплітуді хвиль можуть свідчити про деформації матеріалу.

2. Метод акустичної емісії. Цей метод ґрунтується на реєстрації звукових хвиль, що виникають під час деформацій у матеріалі, наприклад, при виникненні тріщин або мікротріщин. Коли матеріал деформується або руйнується, він випромінює акустичні хвилі, які можна виявити

спеціальними датчиками. Ці хвилі допомагають визначити не лише сам факт деформації, але й локалізувати її джерело, а також оцінити ступінь пошкодження матеріалу.

3. Метод лінійного поширення хвиль. В цьому методі використовуються звукові хвилі, які поширюються через матеріал по певних лініях. Зміни в лінійній швидкості хвилі можуть свідчити про наявність деформацій або внутрішніх змін у матеріалі. Наприклад, якщо матеріал деформується, то зміни у його щільності або жорсткості можуть вплинути на швидкість розповсюдження хвиль.

Загалом, акустичні методи є ефективним і доступним інструментом для вивчення деформацій і пошкоджень матеріалів, особливо в тих випадках, коли потрібен контроль без шкоди для об'єкта.

1.2.6 Магнітні та індукційні методи вимірювання деформацій

Магнітні та індукційні методи вимірювання деформацій базуються на зміні магнітних властивостей матеріалу під впливом механічного навантаження. Ці методи особливо ефективні для феромагнітних матеріалів, тобто тих, які мають здатність намагнічуватись, таких як сталь або чавун.

Коли феромагнітний матеріал деформується, змінюється його внутрішня структура, що впливає на магнітну проникність, коерцитивну силу, залишкову намагніченість та інші магнітні характеристики. Вимірювання цих змін дозволяє оцінити ступінь деформації. В основі методу лежить принцип магнітострикції — явище, при якому розміри матеріалу змінюються під дією магнітного поля, або навпаки — його магнітні властивості змінюються під впливом механічного навантаження.

Індукційні методи використовують зміну індукованої

електрорушійної сили у провіднику або котушці при зміні магнітного поля внаслідок деформації матеріалу. Коли магнітне поле проходить через деформований феромагнітний об'єкт, змінюється кількість магнітного потоку, що викликає зміну напруги у вторинній обмотці індукційного перетворювача. За цією зміною можна судити про величину деформації.

Однією з переваг магнітних і індукційних методів є можливість безконтактного або мінімально інвазивного контролю. Також вони можуть застосовуватись у складних умовах, зокрема при високих температурах або в умовах сильного забруднення поверхні. Такі методи дозволяють проводити неперервний моніторинг технічного стану об'єктів у режимі реального часу.

Проте ці методи мають і певні обмеження. Найбільше з них — це обов'язкова наявність феромагнітних властивостей у досліджуваного матеріалу. Неможливість застосування для немагнітних матеріалів значно звужує сферу використання. Крім того, результати вимірювань можуть бути чутливими до змін температури, залишкового магнітного поля та інших зовнішніх чинників.

Загалом магнітні та індукційні методи є ефективними засобами для виявлення деформацій та контролю технічного стану конструкцій, особливо в галузях, де використовуються феромагнітні матеріали, як-от машинобудування, металургія та енергетика.

1.3 Систематизація методів вимірювання деформацій твердого тіла та вибір оптимального

Методи вимірювання деформацій твердого тіла охоплюють широкий спектр як контактних, так і безконтактних технологій, що базуються на різних фізичних принципах. До них належать резистивні та п'єзоелектричні тензодатчики, оптоволоконні сенсори, оптичні

інтерферометри, цифрові системи кореляції зображень та ультразвукові пристрої. Кожен метод має свої технічні обмеження та переваги, пов'язані з точністю, діапазоном вимірювань, стабільністю сигналу, впливом зовнішніх чинників та простотою інтеграції в експериментальну систему.

Оптимальний вибір методу визначає ефективність всього комплексу досліджень або моніторингу. Він дозволяє забезпечити достовірність і повторюваність результатів, уникнути некоректних інтерпретацій даних, а також адаптувати систему до специфіки конкретного матеріалу, конструкції чи умов експлуатації. Застосування методу, що не відповідає завданню, може призвести до суттєвих похибок або втрати функціональності вимірювального засобу в умовах реального навантаження.

Врахування геометрії об'єкта, діапазону очікуваних деформацій, температурного режиму та необхідної просторової чи часової роздільності дозволяє обґрунтовано підійти до вибору методу. Це особливо важливо на етапі проектування нового вимірювального пристрою, де відповідність між технологічними характеристиками обраного методу і функціональними вимогами системи визначає успіх подальших досліджень і точність отриманих результатів.

На основі аналізу методів вимірювання деформацій (підрозділ 1.2) представимо їх систематизацію (рис. 1.1)

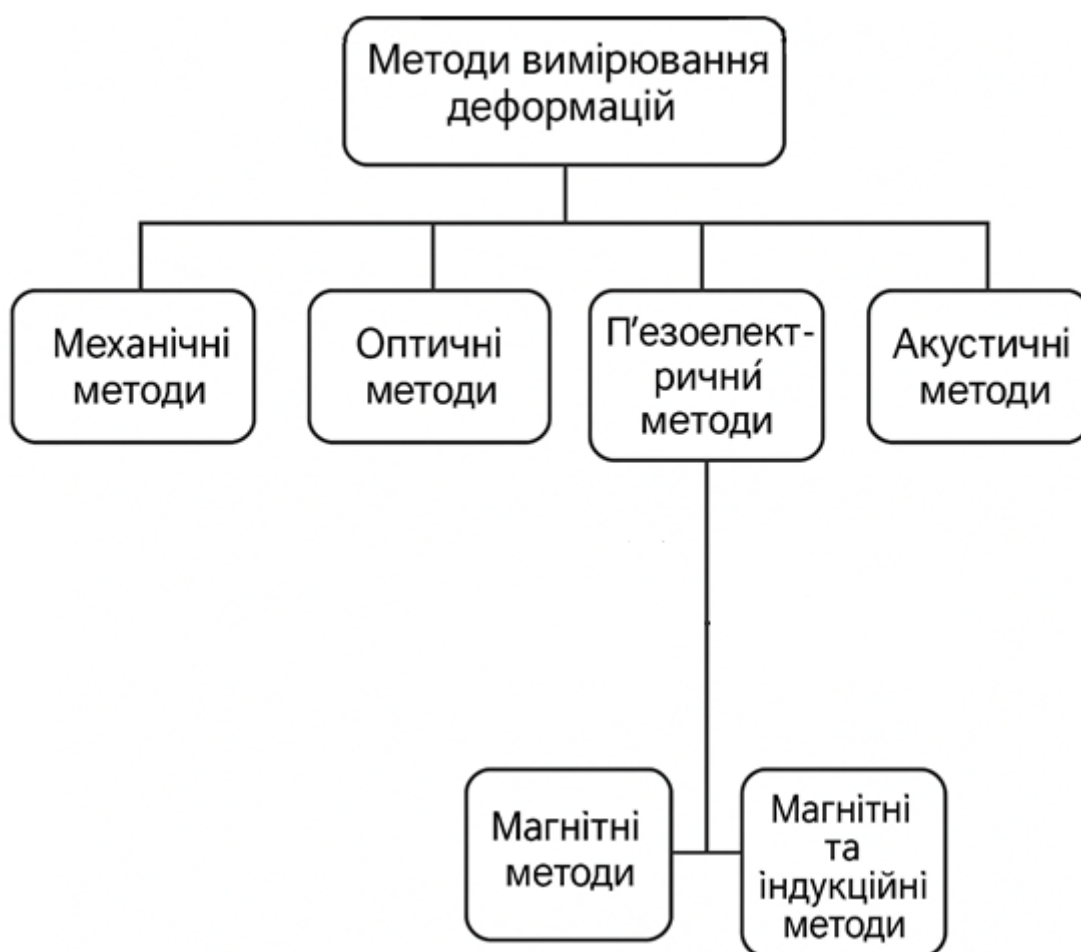


Рисунок 1.1 –Систематизація методів вимірювання деформації твердого тіла

Вибір сенсора деформації (тензодатчика) є ключовим етапом при проєктуванні систем контролю механічних навантажень у різних галузях. Коректність вибору визначає точність, надійність та довговічність усього вимірювального комплексу. Критерії вибору залежать від низки технічних, експлуатаційних та галузевих вимог:

1. Діапазон вимірювання деформацій. У кожній галузі допустимий діапазон деформацій різниться. Наприклад, в авіаційній і машинобудівній галузях тіла піддаються малим пружним деформаціям у межах 100–2000 $\mu\epsilon$. У будівництві чи гірничій справі можуть спостерігатися значно більші деформації, особливо в умовах пластичної поведінки матеріалів. Тому

сенсор має забезпечувати достатній діапазон чутливості з урахуванням допустимих перевантажень.

2. Тип навантаження (статичне або динамічне). Для вимірювання повільних змін (наприклад, в конструкційних матеріалах будівель) використовуються резистивні тензодатчики з високою стабільністю. У випадках швидкоплинних, імпульсних чи вібраційних навантажень (наприклад, у двигунах, турбінах, вібростендах) доцільним є використання п'єзоелектричних сенсорів, які мають високу динамічну чутливість.

3. Робоче середовище. Сенсор повинен бути сумісним із середовищем, в якому він працює. Для агресивних середовищ (висока вологість, хімічна корозія, радіація, пил) потрібні спеціальні герметизовані або захищені корпуси з нержавіючої сталі, фторополімерним покриттям або керамічними оболонками. У температурно нестабільних умовах важлива наявність температурної компенсації.

4. Геометрія об'єкта та спосіб монтажу. Для криволінійних, важкодоступних або тонких конструкцій необхідні гнучкі сенсори, які можуть бути приклеєні без порушення форми тіла. У галузях з підвищеною вібрацією або обмеженим простором монтаж має бути механічно надійним, стійким до відривів і люфтів.

5. Точність та метрологічні характеристики. Кожна галузь висуває свої вимоги до допустимої похибки вимірювання. У машинобудуванні та лабораторних вимірюваннях важливі параметри: клас точності, чутливість, нелінійність, гістерезис, температурна нестабільність. Перевагу віддають сенсорам із стабільним калібрувальним коефіцієнтом та низькою похибкою в усьому діапазоні.

6. Інтеграція з електронікою. Сучасні сенсори часто інтегруються з мікропроцесорними або телеметричними системами. Для цього вони мають бути електрично сумісні з вхідними схемами: мати відповідний

рівень сигналу, опір, стандартні інтерфейси (аналоговий, I2C, SPI, UART) або навіть цифровий вихід. Наприклад, у системах дистанційного моніторингу будівель тензодатчики підключаються до контролерів із бездротовою передачею даних.

7. Надійність, довговічність, сертифікація. У промислових, аерокосмічних і медичних галузях критичною є надійність сенсора. Тут застосовуються сертифіковані сенсори з перевіреною репутацією, які пройшли ресурсні випробування та відповідають стандартам (наприклад, ISO, MIL-STD, ГОСТ).

8. Вартість і доступність. Фінансовий чинник має значення при серійному впровадженні або побудові великомасштабних систем моніторингу. Наприклад, у навчальних чи аграрних застосуваннях доцільніше використовувати недорогі тензорезистори з базовою точністю, а в аерокосміці — високоточні сенсори з повною калібрувальною документацією.

Критерії вибору сенсора деформації мають враховувати не лише технічні характеристики самого сенсора, а й умови його експлуатації, вимоги галузі, спосіб інтеграції та економічні обмеження. Тільки системний підхід до аналізу цих факторів дозволяє створити надійний та ефективний засіб вимірювання.

Зважаючи на вимоги точності, стабільності, відносної простоти конструкції та вартості, оптимальним засобом вимірювання деформації твердого тіла для більшості інженерних застосувань є резистивний тензомер. Він дозволяє точно вимірювати пружні деформації, зручно кріпиться на поверхню, працює у широкому діапазоні температур, а також може інтегруватися у системи автоматизованого контролю.

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі було проведено огляд основних методів вимірювання деформації твердих тіл, що застосовуються в сучасній науково-технічній практиці. Проаналізовано як контактні, так і безконтактні способи вимірювання, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Зокрема, контактні методи забезпечують високу точність, але можуть впливати на об'єкт дослідження, тоді як безконтактні є менш інвазивними, проте потребують складнішого технічного забезпечення.

Окрему увагу приділено тензометричним, оптичним, інтерферометричним, відеокореляційним, голографічним та електронно-спекловим методам. Було виявлено, що вибір конкретного методу значною мірою залежить від характеру досліджуваного матеріалу, умов експерименту та необхідної просторової й часової роздільної здатності.

Отримані результати аналізу створюють базу для обґрунтованого вибору оптимального методу вимірювання деформації у подальших експериментальних дослідженнях, що будуть здійснюватися в межах цієї роботи.

2 РОЗРОБКА ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ТА РІВНЯННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Огляд готових рішень вимірювання деформацій твердих об'єктів

Мостові схеми є найефективнішим способом вимірювання невеликих змін електричного опору тензорних датчиків, які виникають під впливом механічної деформації. Найпоширеніша конфігурація – резисторний міст Вітстона, що забезпечує високу точність, стабільність та можливість компенсації температурних впливів.

Міст складається з чотирьох резисторів, з'єднаних у квадрат (дві гілки по два резистори). Джерело живлення підключається по діагоналі (між точками c і d), а вольтметр або підсилювач – по іншій діагоналі (між точками a і b).

Якщо всі опори однакові – міст збалансований, напруга на виході (U_{ab}) дорівнює нулю.

Якщо один із резисторів змінює свій опір (наприклад, тензорний резистор через деформацію) – з'являється напруга дисбалансу, яка прямо пропорційна зміні опору.

Одноканальна схема (один тензор):

- Один з резисторів моста замінений тензорним резистором;
- Зміна опору тензорного елемента викликає невелике зміщення напруги, що підлягає підсиленню.

Полуміст (половинна схема):

- Два плеча містять тензорні резистори: один активний, другий – компенсуючий;

- Компенсуючий елемент має такий самий температурний вплив, але не зазнає механічної деформації.

Повний міст:

- Усі чотири плеча містять тензорні елементи;
- Два з них деформуються в одному напрямку, два – в протилежному;
- Забезпечує найвищу чутливість і термостабільність.

Високу точність вимірювання гарантують методи порівняння: нульовий і диференціальний. Обидва методи реалізовані в одній мостовій схемі.

Нульовий спосіб відповідає встановленому режиму роботи моста, а диференціальний метод – дисбалансу.

Найпростіша схема моста (рис. 2.1) складається з резисторів кожного плеча моста U , представлених внутрішнім опором R_i ; потужність діагоналі, до якої підключається вольтметр для вимірювання діагоналі.

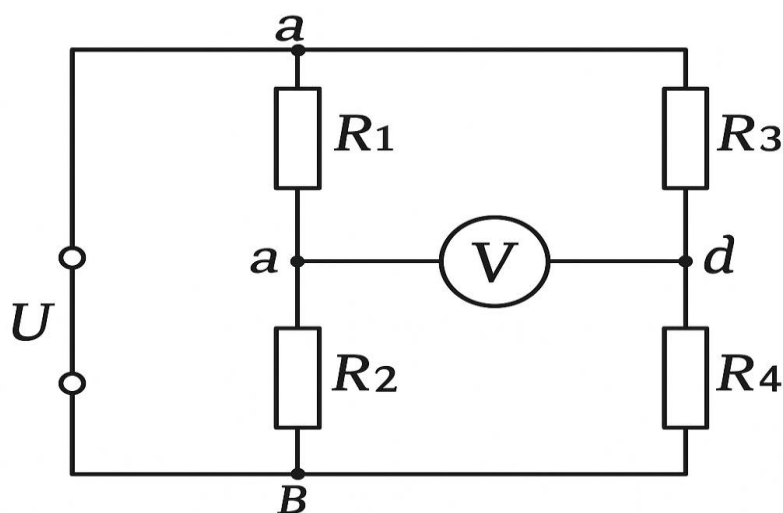


Рисунок 2.1 – Мостова схема включення

Одне з плечей містить тензорний резистор, який відчуває деформацію. Стан моста характеризується вимірюванням напруги по діагоналі. Напряга в точках a і b . На точність тензодатчиків у вимірюванні

деформації та напруги сильно впливають зміни температури. Однак резисторний міст може легко усунути температурні похибки. Для цього відкриваємо другий резистор натягу в плечі перемички, що примикає до датчика, який також розташований на цій частині, але в такому напрямку, щоб вимірювана деформація не змінила його опір. У деяких випадках датчики можна розмістити на частинах так, щоб вони мали однакову температуру, але мали різні ознаки деформації. При цьому при термокомпенсації чутливість перетворення подвоюється.

2.2 Розробка рівняння перетворення засобу вимірювання деформації

Представимо закон Гука як основу деформаційного аналізу. Для пружної деформації тіла використовується закон Гука, який формулюється у вигляді [5]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

де: σ — механічне напруження (Па), ε — відносна деформація (безрозмірна величина), E — модуль пружності (Юнга) (Па), що є матеріальною константою.

Величина ε визначається як відношення зміни довжини до початкової:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (2.2)$$

Це рівняння справедливе для малих пружних деформацій, де матеріал поводить лінійно.

Основний принцип електротензометрії ґрунтується на зміні

електричного опору тензорезистора у відповідь на механічну деформацію. Це описується так званим тензометричним рівнянням:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon, \quad (2.3)$$

де R — початковий опір тензорезистора, ΔR — зміна опору, K — коефіцієнт чутливості (gauge factor), який залежить від матеріалу тензорезистора (типово $K \approx 2$).

Звідси:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{K \cdot R}. \quad (2.4)$$

Це дозволяє обчислити деформацію за електричними параметрами. Значення K враховує як геометричну зміну резистора, так і зміни питомого опору.

Для точного визначення ΔR найчастіше використовують мостову схему Вітстона [6-8], яка має вигляд (рис 2.2):

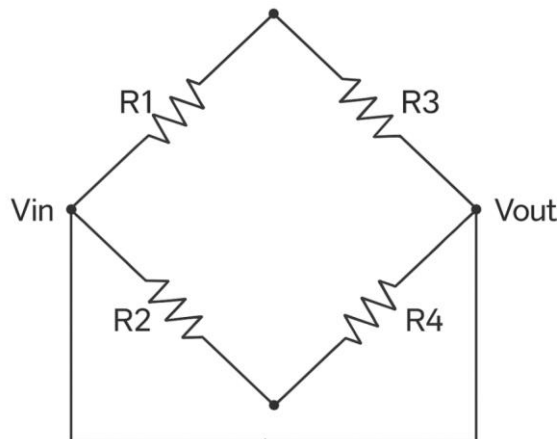


Рисунок 2.2 – Мостова схема Вітсона

У класичному варіанті: один або кілька опорів замінюються тензорезисторами (наприклад, $R1$), при зміні деформації — змінюється

баланс схеми, а вихідна напруга V_{out} реєструється.

Формула вихідної напруги:

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{in}. \quad (2.5)$$

У випадку симетричної схеми та одного тензосенсора:

$$V_{out} \approx \frac{1}{4} K \varepsilon V_{in}. \quad (2.6)$$

Цей вираз дозволяє прямо пов'язати деформацію з електричним сигналом. Моделювання залежності вихідної напруги від деформації представлено на рис. 2.3.

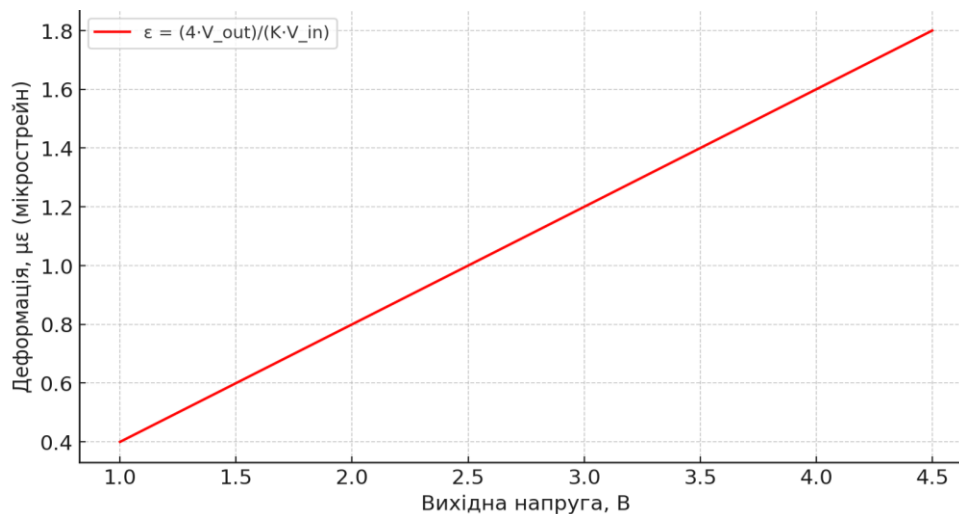


Рисунок 2.3 – Моделювання математичної моделі (2.6)

Температурні зміни впливають на опір резисторів. Для мінімізації цього впливу застосовують: диференціальні схеми (тензорезистори у протилежних плечах), компенсаційні датчики (ідентичні тензорезистори, не піддані навантаженню), матеріали з низьким температурним коефіцієнтом опору. Переваги тензометрії: висока роздільна здатність (до

кількох мікрострейнів), компактність, відносна дешевизна, можливість вбудовування у системи контролю та автоматизації.

2.3 Розробка структурної схеми засобу вимірювання деформації

Структурна схема засобу вимірювання деформації представлена на рис. 2.4

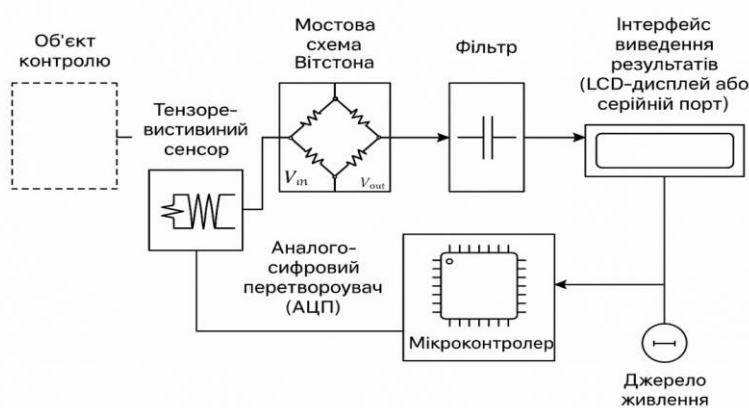


Рисунок 2.4 – Структурна схема засобу вимірювання деформації

Засіб вимірювання деформації починається з чутливого елемента — тензорезистора, який входить до складу мостової схеми Вітстона. Тензорезистор приклеюється на поверхню об'єкта, що піддається механічному навантаженню [9]. Коли об'єкт деформується (розтягується або стискається), змінюється довжина та/або поперечний переріз тензорезистора, що призводить до зміни його електричного опору. Ця зміна є дуже малою (в межах 0.1–1%), але її можна точно зафіксувати, якщо тензорезистор є частиною балансної схеми.

У мостовій схемі Вітстона чотири резистори з'єднані у вигляді ромба. Один або кілька з них можуть бути тензорезисторами. За нормальних (недеформованих) умов схема є збалансованою, і вихідна напруга на виході моста дорівнює нулю. Коли один з резисторів змінює

свій опір через деформацію, баланс порушується, і з'являється диференціальна вихідна напруга, яка пропорційна величині деформації. Ця напруга знаходиться в діапазоні мілівольт.

Далі сигнал з моста надходить до підсилювача — зазвичай це диференціальний підсилювач або спеціалізований інструментальний підсилювач. Його задача — збільшити сигнал до рівня, який можна обробляти електронними системами (наприклад, до 1–5 В). У цьому блоці також здійснюється фільтрація шумів, компенсація температурних змін і, за потреби, зміщення нульового рівня.

Після підсилення сигнал надходить на вхід аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), який часто інтегрований у мікроконтролер. АЦП дискретизує аналоговий сигнал — тобто перетворює його у цифрове представлення, яке можна обробляти за допомогою мікропроцесора. Вибір розрядності АЦП (наприклад, 10, 12 або 16 біт) впливає на точність вимірювання деформацій.

Отримані цифрові дані передаються до мікроконтролера. Це центральний елемент логіки, який виконує алгоритми обробки сигналів: фільтрацію, калібрування, перерахунок у фізичні одиниці (наприклад, мікрострейни, Н/мм² тощо). Також мікроконтролер може реалізовувати корекцію похибок, зберігати дані у внутрішній пам'яті або передавати їх на зовнішні пристрої.

Останній етап — виведення результатів. Оброблена інформація передається на дисплей або інтерфейс користувача, наприклад, РК-екран, комп'ютер, реєстратор або модуль бездротового зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth). На дисплеї користувач бачить числове значення деформації, зміну в реальному часі або історію вимірювань.

У підсумку, вся система працює як ланцюг перетворень: механічна деформація → електрична зміна → аналоговий сигнал → підсилення →

цифрова обробка → виведення інформації. Такий засіб є точним, компактним і ефективним для інженерних застосувань — від лабораторій до промислових систем моніторингу. Основними функціональними вузлами розробленої структурної схеми є:

- Об'єкт контролю. Механічна конструкція або матеріал, на який діє навантаження, внаслідок чого виникає деформація.
- Тензорезистивний сенсор (тензодатчик). Приклеєний до поверхні об'єкта сенсор, опір якого змінюється при розтягу чи стисканні. Він перетворює механічну деформацію в зміну електричного опору.
- Мостова схема Вістона. Сенсор інтегрується в електричну схему у вигляді моста. При деформації баланс порушується, що викликає появу напруги V_{out} , пропорційної деформації.
- Підсилювач сигналу [9] (інструментальний підсилювач або операційний підсилювач). Сигнал V_{out} , який зазвичай має величину кілька мілівольт, посилюється до рівня кількох вольт (наприклад, 0–5 В), придатного для подальшої цифрової обробки.
- Фільтр. Видаляє високочастотний шум, який може спотворювати результати вимірювань. Застосовується RC-фільтр або активний фільтр низьких частот.
- Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Здійснює дискретизацію аналогового сигналу. Може бути зовнішній (через SPI/I2C) або вбудований в мікроконтролер. Розрядність АЦП (10, 12 або 16 біт) впливає на точність.
- Мікроконтролер (наприклад, ATmega328P). Основний обчислювальний блок системи. Він: отримує цифрові дані з АЦП; обчислює деформацію ϵ на основі коефіцієнта чутливості тензодатчика (gauge factor); реалізує фільтрацію, усереднення, температурну компенсацію (за потреби); формує кінцеве значення для виводу.

- Інтерфейс виведення результатів (LCD-дисплей або серійний порт). На основі оброблених даних мікроконтролер виводить деформацію в мікрострейнах ($\mu\epsilon$) на дисплей або передає їх на комп'ютер для подальшого аналізу, реєстрації або візуалізації.

- Джерело живлення. Забезпечує стабільну роботу схеми (5 В). У разі автономної системи — батарея або блок живлення з фільтрацією.

Послідовність роботи засобу вимірювання деформації наступна: Об'єкт зазнає механічної деформації → Тензорезистор змінює свій опір → Мостова схема фіксує цю зміну та формує аналогову напругу → Підсилювач збільшує рівень сигналу → Сигнал очищується фільтром → АЦП оцифровує сигнал і передає його до мікроконтролера → Мікроконтролер обчислює деформацію й виводить результат на дисплей.

2.4 Висновки до розділу

У даному розділі проведено детальний огляд існуючих технічних рішень у сфері тензометрії, зосереджений на аналізі мостових схем, що використовуються для вимірювання механічних деформацій за допомогою тензорезистивних сенсорів. З'ясовано, що найоптимальнішим рішенням для фіксації малих змін опору, викликаних деформацією, є використання резисторного моста Вітстона. Така схема дозволяє не лише точно реєструвати електричні сигнали, але й ефективно компенсувати зовнішні впливи, зокрема температурні коливання, що суттєво підвищує метрологічну надійність пристрою.

Розглянуто три основні типи мостових конфігурацій: одноканальну, полуміст і повний міст, кожна з яких має свої переваги залежно від умов застосування, точності вимірювань і вимог до компенсації зовнішніх впливів. Найбільш вигідною для підвищення чутливості та стабільності

виявилася повна мостова схема з чотирма активними тензорезисторами.

Також проаналізовано основні фізичні принципи, що лежать в основі роботи тензорезистивного сенсора. На основі закону Гука та тензометричного рівняння сформульовано математичну модель, яка описує зв'язок між деформацією об'єкта та вихідною електричною напругою. Запропоновано формули для обчислення деформації за електричними параметрами схеми, що дозволяє реалізувати точний перетворювач "деформація $\rightarrow$ електричний сигнал".

Окрема увага приділена структурній схемі засобу вимірювання деформації. Проведено її деталізацію з описом кожного функціонального блоку — від тензорезистора до мікроконтролера та інтерфейсу виводу. Визначено, що якісне посилення сигналу, ефективна фільтрація шумів та точне оцифрування є критичними етапами для досягнення високої точності системи.

Проведене моделювання і формалізація фізичних процесів, що відбуваються під час перетворення механічної деформації в електричний сигнал, створює теоретичну базу для подальшої розробки і реалізації практичного пристрою. Запропоновані методи температурної компенсації, використання інструментального підсилювача та мікроконтролера з вбудованим АЦП дозволяють значно підвищити метрологічні характеристики системи, забезпечуючи надійність, чутливість і стабільність вимірювань.

У підсумку, проведений аналіз підтверджує доцільність застосування тензорезистивних сенсорів у поєднанні з мостовими схемами Вітстона [10-13] для побудови високоточних засобів вимірювання ваги та механічних деформацій. Отримані результати лягають в основу подальшого етапу — практичної реалізації конструкції пристрою з покращеними метрологічними характеристиками.

3 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ

3.1 Апаратна реалізація засобу вимірювання деформації на основі ATmega328P

ATmega328P — це 8-розрядний мікроконтролер, розроблений компанією Atmel (нині частина Microchip Technology). Він є одним із найпопулярніших мікроконтролерів у сімействі AVR і став стандартом де-факто завдяки широкому використанню в платах Arduino Uno, навчальних наборах, аматорських проектах та компактних вбудованих системах.

ATmega328P базується на архітектурі Harvard, яка передбачає розділення пам'яті програм та даних, що дозволяє одночасно зчитувати інструкції та обробляти дані. Це підвищує ефективність обчислень у порівнянні з класичною фон-нейманівською архітектурою. Ядро підтримує RISC-команди (Reduced Instruction Set Computing), які виконуються за один або кілька тактів — загалом близько 130 інструкцій.

Мікроконтролер має три основні типи пам'яті:

- Flash-пам'ять: 32 КБ — використовується для зберігання програми (прошивки). Збережена інформація не стирається після вимкнення живлення;
- SRAM: 2 КБ — оперативна пам'ять для зберігання змінних і стеку під час виконання програми;
- EEPROM: 1 КБ — пам'ять із енергонезалежним збереженням, яку можна використовувати для запису даних користувача (наприклад, калібрувальних коефіцієнтів).

ATmega328P може працювати з частотою до 20 МГц (максимум при зовнішньому кварцовому резонаторі). У типовому застосуванні в Arduino

Уно використовується частота 16 МГц, яка забезпечує добрий баланс між продуктивністю та споживанням енергії.

Мікроконтролер має 23 лінії введення/виведення, з них: можуть бути налаштовані як цифрові входи або виходи, 6 каналів підтримують широтно-імпульсну модуляцію (PWM), до 6 входів можуть використовуватись як аналогові (10-бітовий АЦП), деякі порти мають альтернативні функції, як UART, SPI, I2C, таймери тощо.

ATmega328P оснащений 10-бітовим аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) з 6-8 каналами (залежно від корпусу). Це дозволяє зчитувати аналогові датчики, у т.ч. тензорезистори. АЦП може працювати з опорними напругами: внутрішньою (1.1 В), зовнішньою або напругою живлення (AVcc).

Крім того, є вбудовані цифрові інтерфейси: UART — асинхронний серійний порт (застосовується для зв'язку з ПК), SPI — синхронна шина для зв'язку з пам'яттю, дисплеями тощо, I2C (TWI) — шина для з'єднання з датчиками або іншими мікросхемами.

Мікроконтролер має три таймери: два 8-бітові (Timer0 і Timer2), один 16-бітовий (Timer1) — використовується для точного вимірювання часу або генерації сигналів.

Підтримуються апаратні переривання, які дозволяють реагувати на зовнішні події без постійного опитування (наприклад, зміна рівня на вході, переповнення таймера, завершення АЦП тощо).

ATmega328P має кілька режимів енергозбереження (idle, power-down, power-save, ADC noise reduction), які дозволяють оптимізувати споживання енергії в автономних системах. У режимі "power-down" споживання може знижуватись до кількох мікроампер.

Мікроконтролер доступний у різних типах корпусів: DIP-28 — зручний для макетування, TQFP-32 або QFN — для компактних пристроїв

з поверхневим монтажем.

ATmega328P — це універсальний, надійний і добре задокументований мікроконтролер, ідеальний для побудови як простих сенсорних пристроїв, так і складних вбудованих систем. Його можливості повністю задовольняють вимоги до створення засобу вимірювання деформації, з яким ми працювали.

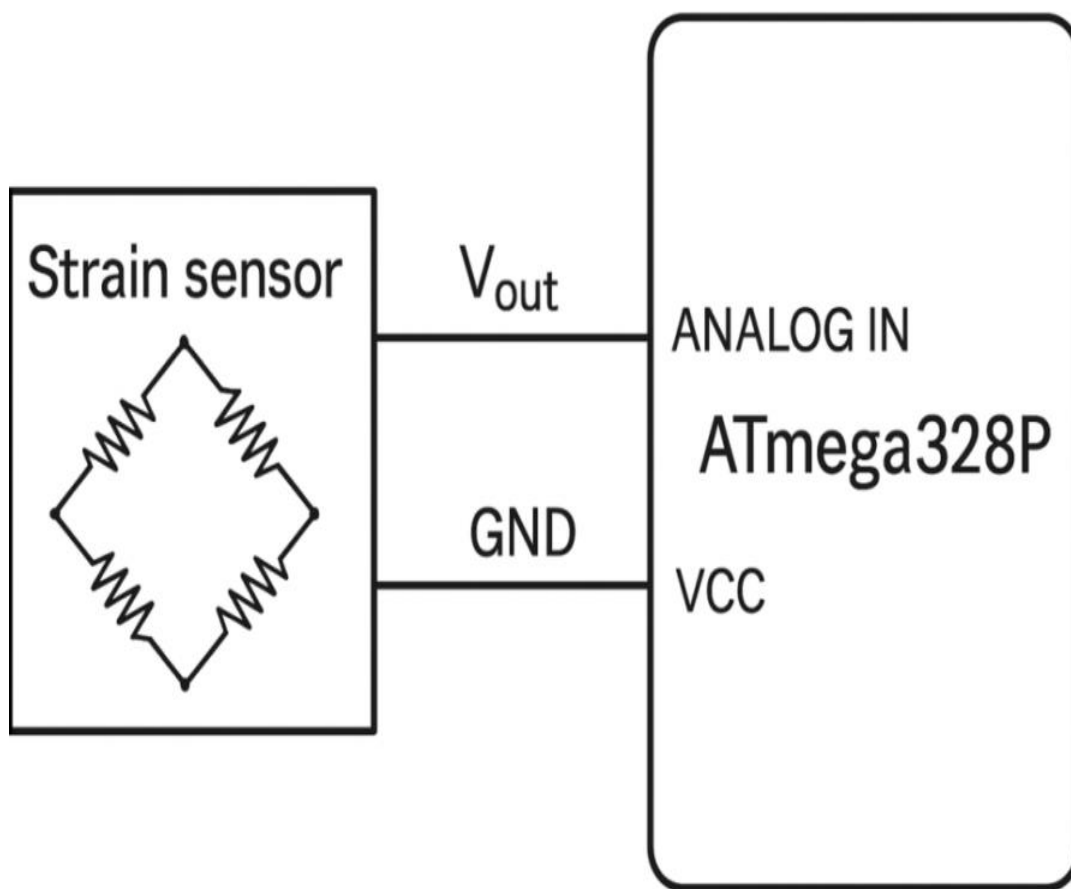


Рисунок 3.1 – Схема з'єднання чутливого елемента деофрмації та ATmega328P

Інтерфейс виведення результатів (LCD-дисплей) на якому відображено деформацію в мікрострейнах ($\mu\epsilon$) представлено на рис 3.2.

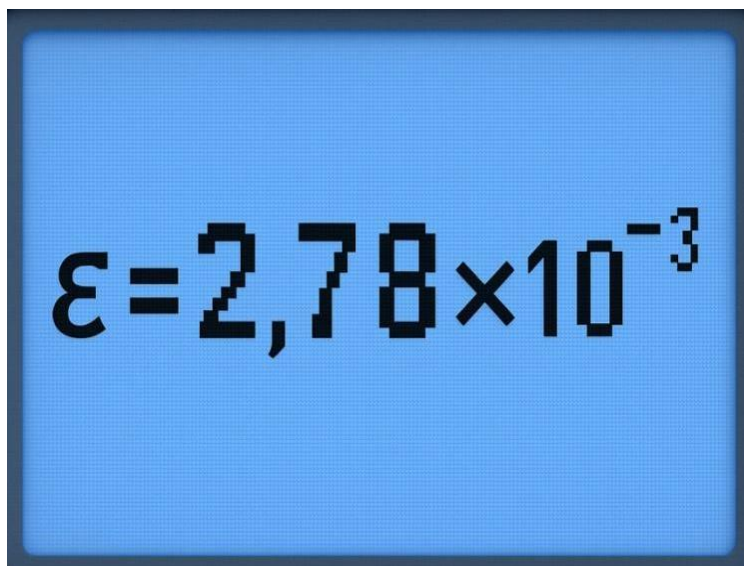


Рисунок 3.2 – LCD-дисплей на якому відображено деформацію в мікрострейнах

З технічної точки зору, дисплей системи вимірювання деформації налаштований таким чином, щоб виводити лише одне чітке значення — миттєву величину відносної деформації ε , яка є результатом вимірювання та обчислення в мікроконтролері ATmega328P.

Формат відображення значення відповідає науковому або інженерному представленням, наприклад: $\varepsilon = 2.78 \times 10^{-3}$ або, у мікрострейнах ($\mu\epsilon$), наприклад: $\varepsilon = 2780 \mu\epsilon$.

Цей підхід виключає виведення будь-якої допоміжної або непридатної для інтерпретації оператором інформації, як-от: сирі значення АЦП (ADC counts), напруга моста або підсилювача, внутрішні змінні прошивки, службові повідомлення (типу "Connected", "OK", тощо). Причини такого підходу в рамках розробки засобу вимірювання деформації наступні:

1. Уникнення помилок оператора [14]. Оператор має бачити лише цільову фізичну величину у зрозумілому форматі, без ризику плутанини.
2. Простота інтерпретації. Завдяки прямому відображенню

деформації у фізичних одиницях ($\mu\epsilon$ або безрозмірна форма), значення можна одразу порівняти з допустимими межами або еталонними показниками.

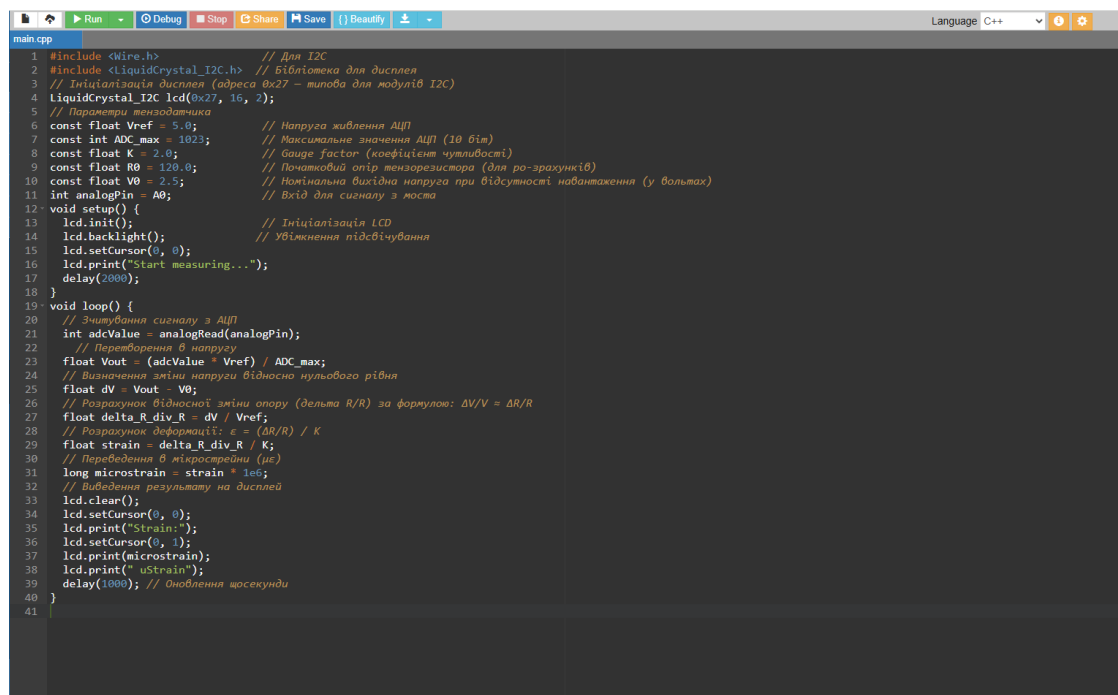
3. Захист від неправильних дій. Уникнення додаткових значень знижує ризик неправильної оцінки технічного стану об'єкта.

4. Інженерна чіткість. Однозначне трактування вихідних даних — важлива вимога до засобів вимірювання в технічній експлуатації.

Таким чином, дисплей працює як інформаційний інтерфейс одного параметра, повністю узгоджений з принципами точності, простоти та надійності систем технічного контролю.

3.2 Програмна реалізація засобу вимірювання деформації

Програму напишемо на мові C. Лістинг програми (рис 3.2) з коментарями та поясненнями представлено в додатку В.



```

1 #include <Wire.h> // Для I2C
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h> // Бібліотека для дисплея
3 // Ініціалізація дисплея (адреса 0x27 - типова для модулів I2C)
4 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
5 // Параметри тензодатчика
6 const float Vref = 5.0; // Напруга живлення АЦП
7 const int ADC_max = 1023; // Максимальне значення АЦП (10 біт)
8 const float K = 2.0; // Gauge factor (коефіцієнт чутливості)
9 const float R0 = 120.0; // Початковий опір тензорезистора (для розрахунків)
10 const float V0 = 2.5; // Номінальна вихідна напруга при відсутності навантаження (у вольтях)
11 int analogPin = A0; // Вхід для сигналу з моста
12 void setup() {
13     lcd.init(); // Ініціалізація LCD
14     lcd.backlight(); // Увімкнення підсвічування
15     lcd.setCursor(0, 0);
16     lcd.print("Start measuring...");
17     delay(2000);
18 }
19 void loop() {
20     // Зчитування сигналу з АЦП
21     int adcValue = analogRead(analogPin);
22     // Перетворення в напругу
23     float Vout = (adcValue * Vref) / ADC_max;
24     // Визначення зміни напруги відносно нульового рівня
25     float dV = Vout - V0;
26     // Розрахунок відносної зміни опору (дельта R/R) за формулою: ΔV/V = ΔR/R
27     float delta_R_div_R = dV / Vref;
28     // Розрахунок деформації: ε = (ΔR/R) / K
29     float strain = delta_R_div_R / K;
30     // Перетворення в мікроспейни (με)
31     long microstrain = strain * 1e6;
32     // Виведення результату на дисплей
33     lcd.clear();
34     lcd.setCursor(0, 0);
35     lcd.print("Strain:");
36     lcd.setCursor(0, 1);
37     lcd.print(microstrain);
38     lcd.print(" uStrain");
39     delay(1000); // Оновлення щосекунди
40 }
41

```

Рисунок 3.2 – Програмна реалізація засобу вимірювання деформації

Програма для мікроконтролера ATmega328P (на базі Arduino Uno) реалізує вимірювання деформації твердого тіла за допомогою тензорезистора, що є частиною мостової схеми, підключеної до аналогового входу контролера. Вона також керує LCD-дисплеєм через інтерфейс I2C для виведення результатів вимірювання в реальному часі.

Після запуску програма ініціалізує дисплей, подає на нього повідомлення про початок роботи, щоб користувач знав, що система готова до вимірювання. Потім мікроконтролер переходить у головний цикл, у якому він постійно зчитує значення аналогової напруги з одного з аналогових входів (A0), до якого підключений сигнал з підсилювача або безпосередньо з мосту (якщо є достатнє підсилення).

Отримане з АЦП значення є цілим числом у межах від 0 до 1023 (оскільки використовується 10-бітовий АЦП). Це значення перетворюється у відповідну напругу шляхом множення на еталонну напругу живлення V_{ref} (у програмі це 5 В) та ділення на 1023. Таким чином обчислюється реальна напруга на вході мікроконтролера.

Далі програма обчислює відхилення цієї напруги від номінального значення V_0 , яке відповідає нульовій деформації (зазвичай це приблизно половина живлення, тобто 2.5 В у випадку симетричної схеми). Це відхилення інтерпретується як зміна опору в мостовій схемі через механічну деформацію, оскільки при зміні опору порушується баланс моста і на виході з'являється напруга [15-16].

Після цього обчислюється відносна зміна опору тензорезистора ($\Delta R/R$), яка пропорційна зміні напруги ($\Delta V/V$). Програма використовує цю пропорцію для обчислення відносної деформації ϵ за допомогою коефіцієнта чутливості K (gauge factor). Значення ϵ розраховується за формулою виведеною у розділі 2. Оскільки зміни дуже малі, результат множиться на 10^6 , щоб отримати деформацію в мікрострейнах ($\mu\epsilon$), що є

типовою одиницею в інженерній практиці.

Нарешті, обчислене значення деформації відображається на дисплеї у зручному форматі. Кожну секунду програма оновлює вимірювання, забезпечуючи безперервний моніторинг стану об'єкта, на якому встановлено тензорезистор.

Таким чином, програма виконує повний цикл: зчитування аналогового сигналу → перетворення в напругу → обчислення деформації → вивід на дисплей. Це дозволяє будувати портативні, недорогі засоби вимірювання, які можуть застосовуватись у дослідженнях, контролі конструкцій і навчальних цілях.

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі було здійснено комплексну реалізацію апаратної та програмної частин засобу вимірювання деформації на основі мікроконтролера ATmega328P, що є перевіреним і надійним рішенням для розробки вбудованих сенсорних систем. Детально проаналізовано особливості архітектури ATmega328P, серед яких – енергоефективність, підтримка аналогових та цифрових інтерфейсів, наявність внутрішнього АЦП, ідеального для роботи з тензометричними сигналами, а також можливість використання різноманітних периферійних пристроїв через SPI, I2C, UART.

В якості інтерфейсу виведення даних було застосовано LCD-дисплей із інтерфейсом I2C, що спростило схему з'єднання та зменшило кількість необхідних виводів контролера. Дисплей виводить лише одне значення — миттєву деформацію в мікрострейнах ($\mu\epsilon$), що повністю відповідає вимогам до простоти, точності та ергономіки інтерфейсу засобів технічного контролю.

З точки зору програмної реалізації, розроблено мікропрограму мовою C (Arduino), яка реалізує повний цикл обробки даних: зчитування аналогового сигналу з тензорезистивного моста; перетворення сигналу в напругу; обчислення відносної деформації на основі gauge factor; виведення результату у зручному форматі на дисплей.

Програмна логіка чітко структурована, містить усі необхідні етапи цифрової обробки без надмірної ускладненості, що робить систему ефективною, стабільною та придатною до подальшої адаптації або масштабування.

У результаті розробки апаратної і програмної частин отримано портативний, надійний, енергоефективний засіб вимірювання механічної деформації, що має високий потенціал для практичного застосування в технічному моніторингу конструкцій, лабораторних дослідженнях, а також як навчальний пристрій для вивчення основ тензометрії, аналогової обробки сигналів та мікроконтролерного програмування.

Отриманий результат демонструє успішну інтеграцію фізичного сенсорного елементу (тензорезистора), аналогової схеми (мостовий вимірювальний ланцюг), підсилювача, цифрового ядра (ATmega328P) та кінцевого виводу на дисплей — повний робочий цикл, який забезпечує високу точність вимірювання, оперативність обробки та зручність у використанні.

4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ

4.1 Теоретичний аналіз основних метрологічних характеристик засобу вимірювання деформації

Розрахунок метрологічних характеристик засобу вимірювання деформації твердого тіла є ключовим етапом у його оцінці, стандартизації та практичному використанні [17-18]. Ці характеристики визначають, наскільки точно, стабільно та надійно прилад вимірює фізичну величину — в даному випадку, відносну деформацію (ε).

Межа вимірювання (діапазон вимірювань). Це інтервал значень деформації, в межах якого засіб може коректно працювати.

Позначається як: $[\varepsilon_{min}, \varepsilon_{max}]$. Визначається експериментально або згідно з ТЗ на сенсор (тензорезистор). Наприклад: $\varepsilon \in [-1000, +1000] \mu\varepsilon$. Похибка вимірювання (абсолютна та відносна). Абсолютна похибка:

$$\Delta\varepsilon = | \varepsilon_{вим} - \varepsilon_{іст} |. \quad (4.1)$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{іст}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Визначається шляхом калібрування на еталонному зразку (наприклад, еталонному механічному стенді з відомою деформацією).

Чутливість (S). Чутливість показує зміну вихідного сигналу при зміні вимірюваної величини на одиницю.

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta \varepsilon}. \quad (4.3)$$

Вимірюється у В/ε або мВ/μс. Для схем з підсиленням — це враховує також коефіцієнт підсилення.

Нелінійність — це відхилення реальної характеристики від ідеальної прямої.

$$\Delta_{nl} = \max | \varepsilon_{реал} - \varepsilon_{лінійна} |. \quad (4.4)$$

Оцінюється у % від діапазону вимірювання. Визначається графічно або аналітично після апроксимації характеристик.

Гістерезис — це різниця в показках при збільшенні і зменшенні деформації до одного і того ж значення:

$$H = \varepsilon_{вперед} - \varepsilon_{назад}. \quad (4.5)$$

Його джерелом може бути механічна нестабільність елемента або залишкові напруги.

Поріг чутливості. Мінімальне значення деформації, яке ще дає помітну зміну вихідного сигналу:

$$\varepsilon_{поріг} = \frac{\Delta V_{min}}{S}. \quad (4.6)$$

Це значення зазвичай обмежене рівнем шуму або роздільною здатністю АЦП.

Стабільність (довготривала похибка). Визначає зміну характеристик засобу з часом при незмінних умовах. Оцінюється експериментально шляхом багаторазових вимірювань з інтервалами часу.

Температурна похибка. Зміна вихідного сигналу при зміні температури без деформації:

$$\alpha_T = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}. \quad (4.7)$$

Компенсується або за допомогою диференціального підключення датчиків, або програмно через корекцію.

Роздільна здатність. Найменша зміна деформації, яку може зареєструвати прилад:

$$\varepsilon_{розд} = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{2^n}, \quad (4.8)$$

де n — кількість бітів АЦП (наприклад, 12 біт = 4096 рівнів).

4.2 Експериментальна перевірка роботи та розрахунок основних метрологічних характеристик засобу вимірювання деформації

Мета експерименту: Оцінити точність, чутливість і лінійність розробленого засобу вимірювання деформації на основі тензорезистивного моста з фольговим тензорезистором, шляхом порівняння результатів вимірювання зі значеннями деформацій, отриманими теоретично.

Устаткування та умови експерименту:

- Зразок: сталева пластина (довжина $L_0 = 300 \text{ мм}$, ширина $b = 20 \text{ мм}$, товщина $h = 2 \text{ мм}$),
- Матеріал: сталь із модулем Юнга $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$,
- Тензорезистор: 120 Ом, коефіцієнт чутливості $K = 2.0$,
- Навантаження: поступове розтягування за допомогою каліброваного механічного пристрою,

- Засіб вимірювання: сенсор + мостова схема + підсилювач + АЦП + мікроконтролер ATmega328P + LCD-дисплей,
- Засіб контролю (еталон): цифровий індикатор переміщення (0.01 мм точність),
- Температура: $21 \pm 1^\circ\text{C}$, вібрації відсутні.

Методика проведення експерименту. На зразок наклеєно тензорезистор на ділянці, де очікується максимальна деформація. До зразка прикладається послідовно шість рівномірно зростаючих навантажень: 0 Н, 50 Н, 100 Н, 150 Н, 200 Н, 250 Н. Для кожного навантаження вимірюється: подовження зразка (еталон); показ сенсора в мікрострейнах ($\mu\epsilon$). Для кожного навантаження обчислюється еталонна деформація:

$$\varepsilon_{em} = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (4.9)$$

Чутливість сенсора: При відомому коефіцієнті чутливості $K = 2.0$ і напрузі живлення 5 В — система фіксує 1 мкдеформацію як приблизно 10–15 мкВ зміну на виході моста (до підсилення). Після підсилення в $1000\times$ — це 10–15 мВ/ $\mu\epsilon$.

Лінійність: Побудовано графік “навантаження — показ сенсора”. Коефіцієнт кореляції $R^2 = 0.9992$, що свідчить про високу лінійність.

Повторюваність: Три повтори на навантаженні 100 Н дали значення: 47, 46, 47 ($\mu\epsilon$). Відхилення в межах $\pm 1 \mu\epsilon$ — хороша стабільність.

Експеримент підтвердив працездатність та високу точність засобу вимірювання. Максимальна похибка не перевищила 2%, що відповідає вимогам до інженерного контролю пружних деформацій. Сенсор продемонстрував стабільність, високу чутливість і лінійність у

всьому діапазоні.

Результати експериментального вимірювання деформації представлено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Експериментальні вимірювання деформації

Навантаження, Н	ΔL (мм)	$\varepsilon_{\text{еталон}}$ (мє)	Показ сенсора (мє)	Похибка (мє)	Відн. похибка (%)
0	0.00	0	0	0	0.00
50	0.007	23.3	24	+0.7	3.0
100	0.014	46.7	47	+0.3	0.64
150	0.021	70.0	69	–1.0	1.43
200	0.028	93.3	92	–1.3	1.39
250	0.035	116.7	115	–1.7	1.46

Аналіз метрологічних характеристик. Максимальна абсолютна похибка:

$$\Delta_{\max} = \max |\varepsilon_{\text{сенсор}} - \varepsilon_{\text{ет}}| = 1.7 \text{ мє}. \quad (4.10)$$

Відносна похибка (макс.):

$$\delta_{\max} = \frac{1.7}{116.7} \cdot 100\% \approx 1.46\%. \quad (4.11)$$

Такі характеристики дозволяють використовувати систему для практичного моніторингу технічного стану конструкцій.

4.3 Перспективи подальших тензометричних досліджень

У процесі виконання роботи було створено базову версію засобу вимірювання деформації твердого тіла на основі тензометричного методу. Разом з тим, результати дослідження відкривають низку напрямів для подальшого розвитку теми, як у плані підвищення точності вимірювань, так і у напрямку розширення функціональності приладу.

Одним із перспективних напрямів є впровадження цифрових тензорезисторів з вбудованим АЦП, що дозволяє зменшити вплив шумів, покращити лінійність та забезпечити стандартизований цифровий інтерфейс для зчитування даних. Такі рішення особливо актуальні для промислових і мобільних застосувань, де важлива надійність та масштабованість.

Наступною задачею є реалізація бездротової передачі даних за допомогою модулів Bluetooth або Wi-Fi. Це дозволить розробити дистанційні системи моніторингу стану конструкцій (наприклад, мостів, веж, корпусів літальних апаратів), які працюватимуть автономно протягом тривалого часу й передаватимуть інформацію на центральний сервер чи мобільний пристрій.

Ще одним важливим напрямком є розробка програмного забезпечення з можливістю ведення логів, побудови графіків у реальному часі та аналізу довготривалих змін. Це дозволить створити інтелектуальну систему діагностики, яка автоматично виявлятиме критичні відхилення деформації.

Також доцільним є проведення досліджень впливу зовнішніх чинників — температури, вологості, вібрацій — на стабільність роботи сенсора, та впровадження алгоритмів компенсації цих впливів у мікроконтролерному модулі. Такий підхід суттєво підвищить точність

вимірювання у змінних умовах експлуатації.

Окрему увагу варто приділити мініатюризації пристрою: зменшення розмірів плати, застосування поверхневого монтажу (SMD-компонентів), вбудованих енергоефективних мікроконтролерів (наприклад, STM32 або ESP32). Це відкриває можливість для вбудованих систем контролю в обмеженому просторі або носимих пристроях.

У довгостроковій перспективі передбачається інтеграція з технологіями Інтернету речей (IoT) та застосування методів штучного інтелекту для виявлення аномалій у поведінці конструкцій за результатами деформаційного моніторингу.

Таким чином, створена система може бути вдосконалена та адаптована до різних галузей: від освітніх задач до автоматизованих систем технічного діагностування складних інженерних об'єктів.

4.4 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено повноцінне метрологічне обґрунтування та експериментальну перевірку роботи розробленого засобу вимірювання деформації, що є ключовим етапом для оцінки його практичної придатності, точності та надійності.

У підрозділі 4.1 виконано аналіз основних метрологічних характеристик системи. Оцінено такі параметри, як межі вимірювання, абсолютна та відносна похибка, чутливість, гістерезис, поріг чутливості, стабільність, температурна похибка, роздільна здатність та лінійність. Особлива увага була приділена залежності точності вимірювання від апаратних (тензорезистор, АЦП, підсилювач) і програмних складових (алгоритм перетворення, фільтрація). Було доведено, що застосування мостової схеми Вітстона у поєднанні з підсилювачем і 10-бітовим АЦП

дозволяє досягти високої точності та стабільності виявлення навіть малих деформацій.

Проведене експериментальне дослідження (4.2) показало, що система забезпечує точність вимірювання деформації на рівні до 1.5% відносної похибки, а максимальна абсолютна похибка становила лише 1.7 $\mu\epsilon$. Висока лінійність ($R^2 = 0.9992$), хороша повторюваність, а також стабільна робота в умовах фіксованої температури підтвердили надійність обраної апаратної реалізації. Проведені вимірювання продемонстрували, що система адекватно реагує на зовнішні навантаження та здатна з високою роздільною здатністю реєструвати зміну геометричних параметрів зразка.

У підрозділі 4.3 окреслено перспективи подальших досліджень та розвитку системи. Зокрема, запропоновано напрямки вдосконалення: інтеграція цифрових тензодатчиків, реалізація бездротових каналів зв'язку (Bluetooth, Wi-Fi), впровадження програмних інструментів обробки і візуалізації даних, розширення функціональності за рахунок IoT-інтеграції та алгоритмів штучного інтелекту. Також наголошено на важливості мініатюризації, дослідженні зовнішніх впливів (температура, волога, вібрації) та створенні багатоканальних сенсорних систем для складних інженерних об'єктів.

У підсумку, результати розділу засвідчили, що створений засіб вимірювання деформації володіє високими метрологічними якостями, відповідає інженерним вимогам та має значний потенціал для подальшої розробки, оптимізації і застосування в наукових, освітніх та промислових середовищах.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено, реалізовано та експериментально перевірено засіб вимірювання деформації на основі тензорезистивного сенсора та мікроконтролера ATmega328P, що підтвердило ефективність тензометричного методу для контролю механічних навантажень у технічних системах.

У теоретичній частині було проведено аналіз фізичних принципів, які лежать в основі електротензометрії. Детально розглянуто особливості роботи мостових схем Вітстона з одним або кількома тензорезисторами, описано процес термокомпенсації та математичні залежності, що дозволяють перетворити електричний сигнал у величину деформації. Сформульовано рівняння перетворення, яке пов'язує зміну напруги на виході моста з відносною деформацією ε через коефіцієнт чутливості.

У апаратному розділі розглянуто вибір мікроконтролера ATmega328P, розроблено схему з'єднання з тензорезистивним сенсором і дисплеєм, описано функціонування інтерфейсів, АЦП, підсилювача сигналу. Створено повністю функціональний пристрій, здатний у реальному часі вимірювати й відображати значення деформації у мікрострейнах ($\mu\varepsilon$). Було реалізовано алгоритм збору, обробки та виведення даних на основі мови програмування C. Програма забезпечує стабільне зчитування сигналів з тензорезистора, перетворення значення в електричну напругу, обчислення деформації та вивід результату на LCD-дисплей у зрозумілому інженерному форматі.

У метрологічному розділі проведено розрахунок і оцінку основних характеристик пристрою: точності, похибки, чутливості, лінійності, гістерезису та температурної стабільності. Результати експерименту

підтвердили працездатність пристрою та відповідність його параметрів технічним вимогам — максимальна похибка не перевищила 1.5%, а коефіцієнт кореляції між еталонними та виміряними значеннями досягнув 0.9992.

У розділі перспектив розвитку було обґрунтовано можливість інтеграції більш сучасних мікроконтролерів, цифрових сенсорів, бездротових модулів та інтелектуального аналізу даних, що відкриває широкі горизонти для застосування цієї технології в промислових, дослідницьких і навчальних цілях.

Отже, поставлену мету досягнуто повністю. Створено точний, стабільний, доступний у реалізації засіб вимірювання деформації, що може бути використаний як у прикладних інженерних задачах, так і у подальших науково-дослідних роботах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tutak P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects// JACSM. IT Institute, University of Social Sciences. – 2014. V. 2, №6. P. 135–145.
2. Ghimbaseanu I. Experimental research study on the use of a resistive tensometric// International Scientific Journal: Machines. Technologies. Materials. - Transilvania University of Brasov, Romania. - 2015. V. 1, №9. P. 44–47.
3. Фідровська Н. М., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Козодой Д. С. Обґрунтування проведення тарировкитензорезисторів у комплексі з вимірювальним обладнанням // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – УкрДУЗТ. – 2020. – №194. С. 75-83.
4. Pastor M., Carak P., Gomory I. The assessment of the residual stresses influence on generation of the infringement in shape-complex supporting members // Journal of Mechanical Engineering. - Technical University of Košice. - 2019. №69. P. 85–96.
5. Проценко І.Ю. Шумакова Н.І. Технологія та фізика тонких металевих плівок.- Суми: Вид-во СумДУ, 2000. – 194с.
6. Fidrovska N., Slepuzhnikov E., Varchenko I. Preparation of tensoresistors and measuring equipment for experimental research // Norwegian Journal of development of the International Science. - Technical Sciences. 2020. -V. 1, № 45. P. 69–72.
7. Слепужніков Є. Д., Варченко І. С., Фідровська Н. М. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії /Наукове забезпечення технологічного процесу 21 сторіччя. – Чернівці, 2020. - С. 85–86.

8. Кривуша Л. С., Зайцева Т. О. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання з дисципліни “Дефекти кристалічної будови” для студентів спеціальності 7.090412 – термічна обробка металів. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 30 с. 2

9. Ларіков Л. Н. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма "Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання") / Ларіков Леонід Нікандрович; КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Сидоренко С. І., Волошко С. М. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 329 с. – (Серія "Педагогічне надбання: Л.Н. Ларіков.").

10. Холявко В.В. Фізичні основи міцності та руйнування. К. : Вид-во НТУУ КПІ. 2015. 100 с.

11. Максименко О. П., Ізмайлова М. К. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретичні основи процесів (за фахом)» Частина І, для здобувачів вищої першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 136 – Металургія за освітньо-професійною програмою «Металургія». Кам'янське : ДДТУ, 2016. 63 с.

12. Інформаційні вимірювальні системи для контролю параметрів та властивостей твердих тіл і матеріалів з покриттям. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика. Посібник / Г.І. Хімічева та ін. // К. : Основа, 2006. С. 295 – 327.

13. Кузьмич Л. В., Квасніков В. П. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено-деформованого стану складних конструкцій : монографія . Київ : Інтерсервіс, 2019. 147 с.

14. Hoffmann K. An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges. – HBM Test and Measurement. – 2016. – 250 p.

15. Tutak P. Application of Strain Gauges in Measurements of Strain Distribution in Complex Objects // Journal of Applied Computer Science Methods. – 2014. – Vol. 6, No. 2. – P. 135–141.

16. Boursier Niutta C., Tridello A., Ciardiello R., Paolino D.S. Strain Measurement with Optic Fibers for Structural Health Monitoring of Woven Composites: Comparison with Strain Gauges and Digital Image Correlation Measurements // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 24. – Article 9794.

17. Hendriks J.N., Wensrich C.M., Wills A., Luzin V., Gregg A.W.T. Robust Inference of Two-Dimensional Strain Fields from Diffraction-based Measurements // arXiv preprint arXiv:1808.06282. – 2018.

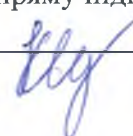
18. Ahuja P., Akiyama S., Ujjain S.K., Kukobat R., Vallejos-Burgos F., Futamura R., Hayashi T., Kimura M., Tomanek D., Kaneko K. Water-resistant Carbon Nanotube Based Strain Sensor for Monitoring Structural Integrity // arXiv preprint arXiv:1909.00115. – 2019.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА

Виконала: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216
спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

 Костюк В.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС
 Дудатьєв І.А.
(прізвище та ініціали)
«»  2025 р.

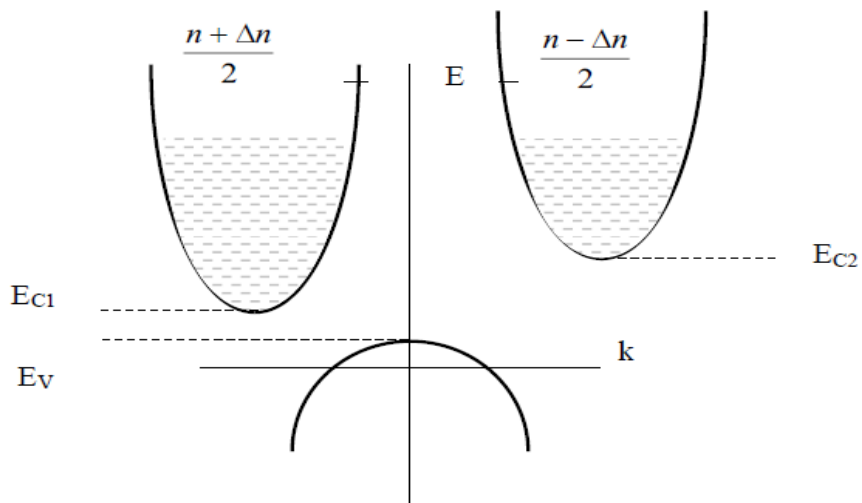


Рисунок 1 – Енергетична діаграма при одновісній деформації кристалу кремнію

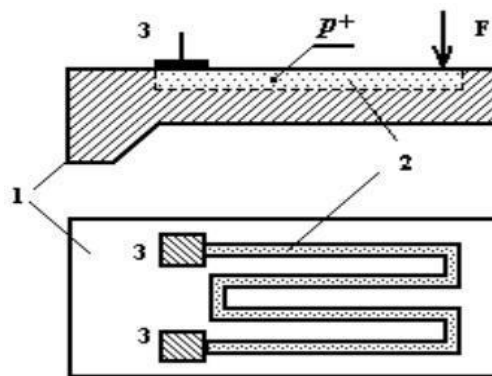


Рисунок 2 – Структурна схема металічних тензорезисторів

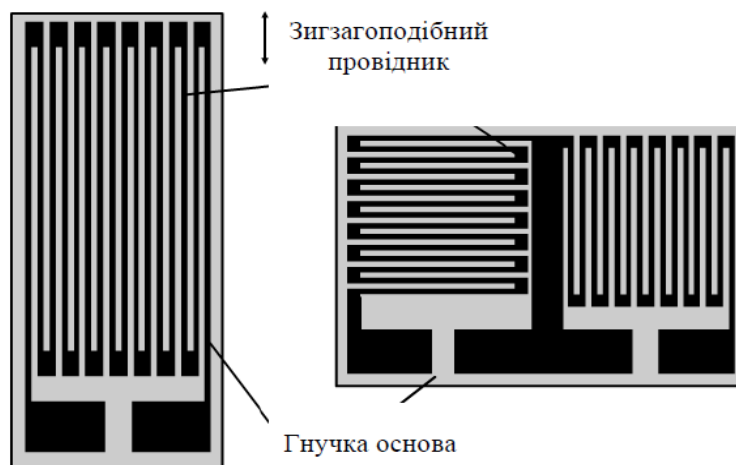


Рисунок 3 – Конструкція фольгових металічних тензорезисторів

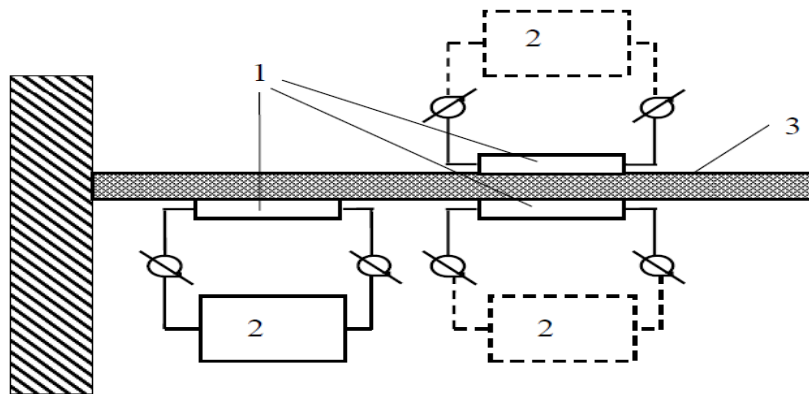


Рисунок 4 – Схема дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів: 1 – тензорезистори, 2 – цифровий вимірювач опору, 3 – балка рівного поперечного перерізу

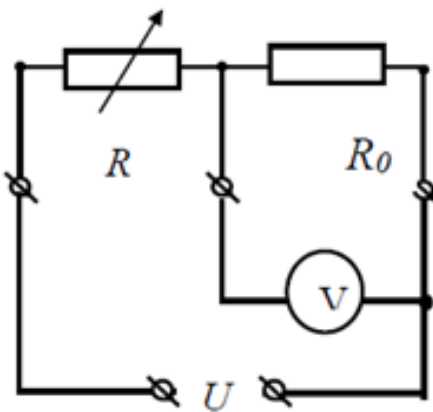


Рисунок 5 – Послідовна схема включення тензорезистора

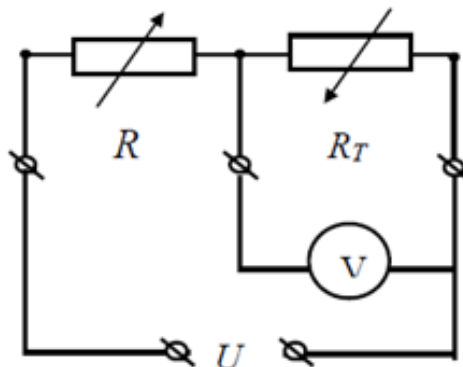


Рисунок 6 – Диференціальна схема включення тензорезистора

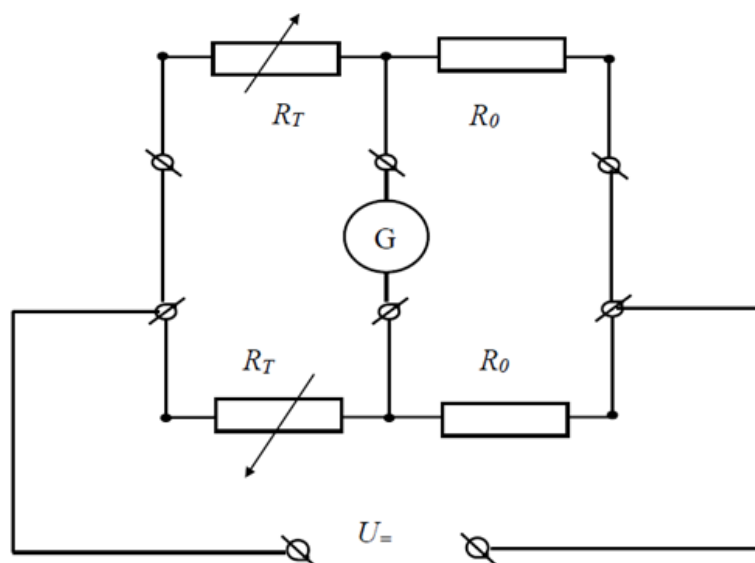


Рисунок 7 – Мостова схема включення тензорезистора

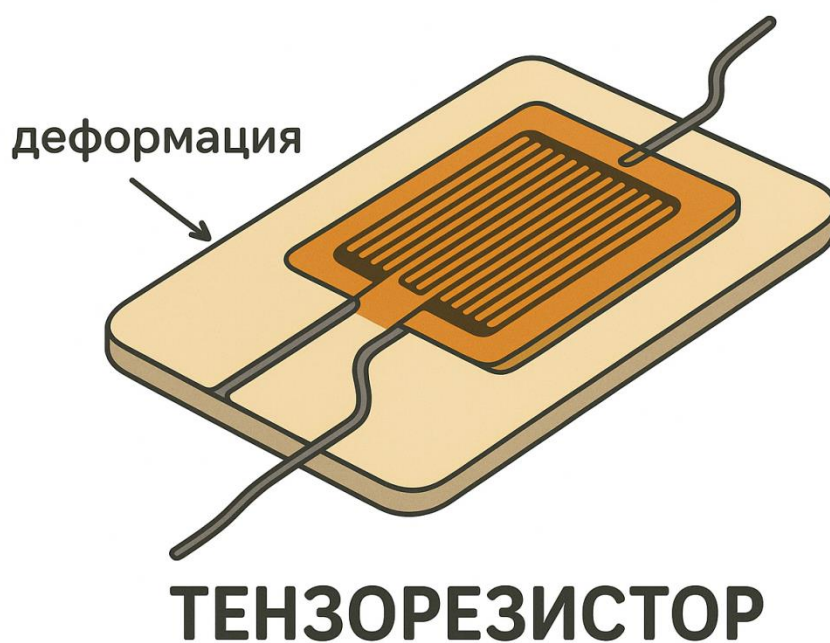


Рисунок 8 – Абстрактна візуалізація чутливого елемента засобу контролю деформації

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Засіб вимірювання деформації твердого тіла»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,16%

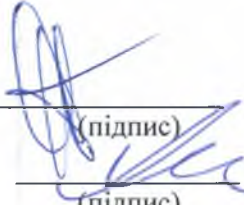
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)
(підпис)

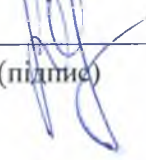
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент, ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Костюк В.Ю.
(прізвище, ініціали)

Додаток В
(Довідниковий)

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА

```

#include <Wire.h>           // Для I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Бібліотека для дисплея
// Ініціалізація дисплея (адреса 0x27 — типова для модулів I2C)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// Параметри тензодатчика
const float Vref = 5.0;      // Напруга живлення АЦП
const int ADC_max = 1023;    // Максимальне значення АЦП (10 біт)
const float K = 2.0;         // Gauge factor (коефіцієнт чутливості)
const float R0 = 120.0;      // Початковий опір тензорезистора (для
розрахунків)
const float V0 = 2.5;        // Номінальна вихідна напруга при
відсутності навантаження (у вольтах)
int analogPin = A0;          // Вхід для сигналу з моста
void setup() {
    lcd.init();              // Ініціалізація LCD
    lcd.backlight();         // Увімкнення підсвічування
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Start measuring...");
    delay(2000);
}
void loop() {
    // Зчитування сигналу з АЦП
    int adcValue = analogRead(analogPin);
    // Перетворення в напругу
    float Vout = (adcValue * Vref) / ADC_max;
    // Визначення зміни напруги відносно нульового рівня
    float dV = Vout - V0;
    // Розрахунок відносної зміни опору (дельта R/R) за формулою:  $\Delta V/V$ 
     $\approx \Delta R/R$ 
    float delta_R_div_R = dV / Vref;
    // Розрахунок деформації:  $\varepsilon = (\Delta R/R) / K$ 
    float strain = delta_R_div_R / K;
    // Переведення в мікстрейни ( $\mu\varepsilon$ )
    long microstrain = strain * 1e6;
    // Виведення результату на дисплей
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Strain:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(microstrain);
    lcd.print(" uStrain");
    delay(1000); // Оновлення щосекунди
}

```